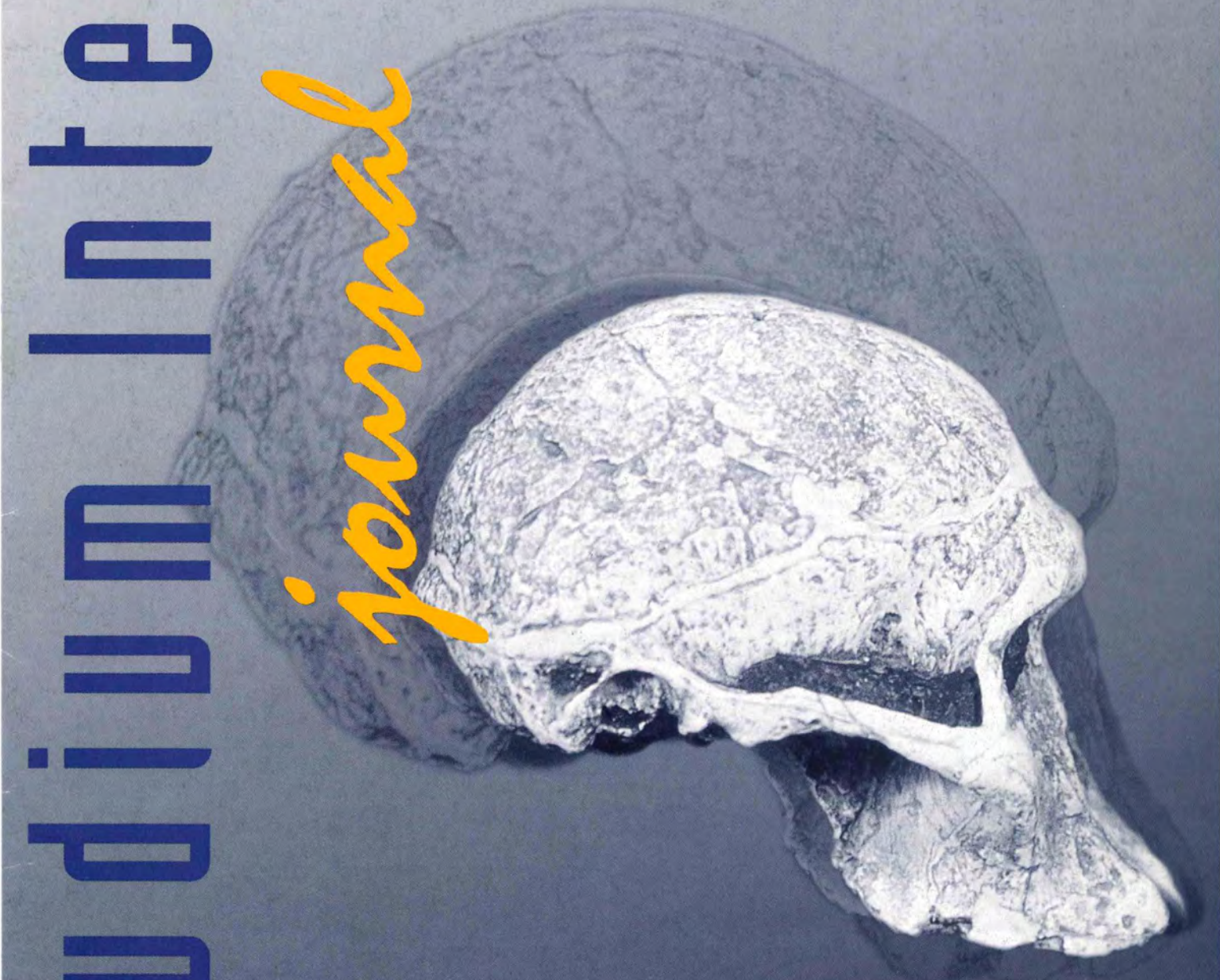
studium integrale journal

- Ozeankruste
- Lucys Großeltern?
- Ursprung der Moose
- Konstanz der Naturkonstanten
- Neues aus der Dinowelt
- Quasare



2. Jg., Heft 2 August 1995

Eine zentrale Frage zur Evolution des Menschen:

Wie entstand der aufrechte Gang?

Michael Brandt:
Der Ursprung des aufrechten Ganges.
Zur Fortbewegung der plio-pleistozänen Hominiden.
Neuhausen: Hänssler, 1995.
168 S., 123 Abb., 13 Tab.,
Format 16,5 x 24cm,
DM 29,95.
ISBN 3-7751-2357-1

Die Entstehung des zweibeinigen Ganges ist ein Kernstück in allen Theorien zur Evolution des Menschen. Als wichtiges Bindeglied zwischen Menschenaffen und Menschen gilt *Australopithecus.* Diese Fossilform zeigt neben zahlreichen großaffenähnlichen Merkmalen auch Anpassungen an den zweibeinigen Gang. Das Fortbewegungsrepertoire von *Australopithecus* wird allerdings kontrovers diskutiert. Das *Homo habilis* zugeordnete postcranielle Skelettmaterial weist Beziehungen teilweise zu *Homo*, aber auch zu *Australopithecus* auf.

Michael Brandt präsentiert eine Gesamtdarstellung des gegenwärtigen Wissens über die Fortbewegung der frühen Hominiden (Menschenartigen). Er weist nach, daß entgegen der verbreiteten Sichtweise das unter den Primaten einmalige Fortbewegungs-repertoire der Australopithecinen dem des Menschen nicht besonders ähnlich ist.

Erhältlich im Buchhandel oder bei:
Studiengemeinschaft Wort & Wissen,
Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn,
Telefon (0 74 42) 8 10 06, Fax (0 74 42) 8 10 08

IMPRESSUM

Herausgeber:
Studiengemeinschaft Wort und Wissen e.V.,
Rosenbergweg 29, D–72270 Baiersbronn,
Tel. (0 74 42) 8 10 06, Fax (0 74 42) 8 10 08

Redaktion:
Dr. Harald Binder, Konstanz
Dr. Thomas Fritzsche, Göttingen
Dr. Reinhard Junker, Baiersbronn
Dr. Volker Kessler, Vierkirchen

Korrespondenzadresse:
Dr. Reinhard Junker, Rosenbergweg 29,
D–72270 Baiersbronn

Graphik/Design:
Regine Tholen AGD, Hüttenberg

Druck und Bindung:
Weihert-Druck Darmstadt

Erscheinungsweise und Bezugsbedingungen:
Die Zeitschrift erscheint zweimal jährlich. Jahresbezugspreis DM 29,50; für Studenten DM 19,50; Preise **inkl.** Versandkosten und MwSt. Auslandspreise auf Anfrage. Einzelhefte: DM 15,– (zzgl. Versandkosten). **Bestellungen** richten Sie an den Herausgeber. Die Abonnementsgebühren werden durch Lastschriftverfahren bezahlt.
Das Abonnement kann mit einer Frist von drei Monaten zum Jahresende gekündigt werden. Die Kündigung muß schriftlich erfolgen.

Alle Rechte vorbehalten.

Die Verantwortung für den Inhalt tragen die jeweiligen Autoren. Der Herausgeber und die Redaktion identifizieren sich nicht zwangsläufig mit allen Details der Darlegungen.

Titelbild: *Australopithecus africanus* (Sts 5). Die Gattung *Australopithecus* steht im Brennpunkt des paläanthropologischen Interesses.

ISSN 0948-6135

STUDIUM INTEGRALE *journal*

2. Jahrgang/Heft 2 – August 1995

INHALT

T. Fritzsche — Das neue Bild von der Ozeankruste — 51
S. Hartwig-Scherer — Lucys Großeltern – die ersten Urmenschen? — 58
R. Junker — Der rätselhafte Ursprung der Moose — 65
T. Portmann — Wie konstant sind die Naturkonstanten? — 68

Kurzbeiträge

N. Pailer — **Weltraumtelegramm:** Quasare geben neue Rätsel auf: Energiemonster am Rande der Welt – Wassereis auf Merkur – Chiron – ein Objekt narrt die Fachwelt — 80
S. Scherer/ H. Binder — **Neues aus der Dino-Welt:** Dinosaurier-Ei mit Embryo – DNA aus fossilen Dinosaurierknochen? Die größten Dinosaurier – Warmblütiger *Tyrannosaurus rex*? — 84
K. Neuhaus — Natürlicher Gentransfer in *Drosophila* — 87
R. Junker — Präkambrische Fossilien — 89
H. Binder — Wiederbelebung von Bakteriensporen aus Dominikanischem Bernstein? — 89
J. Fehrer — Kospeziation und Koevolution in zwei Fällen widerlegt — 90

Streiflichter

Coenzym aus der Ursuppe? — 91
Ursuppe – RNA-Welt – DNA-Protein-Welt — 92
„Beckenknochen" der Walartigen: keine Rudimente — 92
Kopie eines Bumerangs aus dem Paläolithikum mit guten Flugeigenschaften — 92
„Schnelle" Miesmuscheln — 93
Molekulare und morphologische Stammbäume: Harmonie oder Konflikt? — 93

Rezension

M. Stephan — Verbotene Archäologie (Thompson & Cremo) — 94

EDITORIAL

Wie objektiv ist Wissenschaft? Diese Frage wird zumindest in den Naturwissenschaften nicht so oft gestellt. Erkenntnis wird in den Naturwissenschaften oft als etwas ganz „Selbstverständliches" gesehen, als logische Folge der kumulierten Beiträge unzähliger Forscher. In vielen Fällen hat sich das auch praktisch bewährt. Warum also die kritische Rückfrage an die Objektiviät der Naturwissenschaften?

In einem renommierten Pflanzenphysiologie-Lehrbuch heißt es zur Erkenntnisgewinnung in den Naturwissenschaften: „Prinzipiell geht der Weg der Erkenntnisgewinnung aus von experimentellen oder Beobachtungsdaten, die mit Hilfe genau definierter Methoden gewonnen werden. Die Ausgangsdaten liefern die Grundlage für die Hypothesenbildung (Induktion). Die formulierte Hypothese gestattet Schlußfolgerungen (Deduktion). Die Schlußfolgerungen können im Experiment auf ihre Richtigkeit geprüft werden. Aus dem erfolgreichen Wechselspiel von Induktion und Deduktion resultiert schließlich die gesicherte Theorie. Die Grundlagen aller Erkenntnisgewinnung sind also Beobachtungsdaten und experimentelle Daten" (Mohr H & Schopfer P, Lehrbuch der Pflanzenphysiologie, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Aufl.1978, S. 7). Daten sollen also das Entscheidende sein. In der Praxis erweist sich diese Sicht jedoch als unrealistisch. Das beginnt schon damit, daß der Wissenschaftler eben nicht mit den Daten beginnt, sondern mit einer Idee, einer Spekulation oder, wenn er in seinen Forschungen schon vorangeschritten ist, mit einer bislang bewährten Theorie. Entsprechend versucht er, erst einmal Daten zu finden und in der vorgegebenen Richtung hat er einen Blick für Daten. Gleichzeitig aber steht er in Gefahr, für ihn uninteressante oder hinderliche Daten zu übersehen. Dazu kommt, daß die (notwendigerweise!) vorgeschaltete Theorie oder Spekulation die Wahrnehmung und die Gewinnung von Daten kanalisiert, d. h. einerseits ermöglicht, andererseits aber auch verhindert. In der Praxis wendet sich der Wissenschaftler nicht allen erreichbaren Daten mit gleicher Sorgfalt zu.

Daß dem so ist, haben M. A. Cremo & R. L. Thompson in ihrem wissenschaftsgeschichtlichen Werk „Verbotene Archäologie" in bezug auf Daten über menschliche Artefakte gezeigt. Manfred Stephan stellt dieses Buch vor, das über die betroffene Fachdisziplin hinaus für jeden Wissenschaftler und wissenschaftlich Interessierten von Interesse sein dürfte. In der Wirklichkeit des Wissenschaftsbetriebs läßt sich der hervorgehobene Stellenwert der Daten oft nur noch als anstrebenswerte Norm wiederfinden – und, wie Cremo & Thompson zeigen, gelegentlich nicht einmal das.

Damit soll keinesfalls einer pauschalen Wissenschaftsskepsis das Wort geredet werden. Die Freude am wissenschaftlichen Arbeiten beflügelt nicht zuletzt auch die Autoren von Studium Integrale *journal*. Doch gilt es zu erkennen, daß Wissenschaft nicht eine absolute, neutrale Instanz für objektives Erkennen sein kann; damit wäre sie überfordert.

In weiteren Beiträgen werden Grenzen und Möglichkeiten der Datengewinnung und der Wandel von wissenschaftlich begründeten Modellen deutlich, so im Beitrag von Thomas Fritzsche über die Erforschung der Ozeankruste. Die Forschung ist dort aufgrund neuer Entdeckungen und neuer Theorien in raschem Wandel begriffen, und es ist nicht abzusehen, wohin er führen wird. Sigrid Hartwig-Scherer zeigt anhand neuer Funde menschenaffenartiger Skelette auf, daß die Daten nicht nur wie gewohnt evolutionstheoretisch, sondern auch im Rahmen einer Radiation innerhalb von Grundtypen gedeutet werden können. Auch hier gilt es, neue Deutungswege zu beschreiten, um einen neuen Blick für neue und altbekannte Daten zu gewinnen. In einigen Kurzbeiträgen wird deutlich, daß neue Daten etablierte Vorstellungen zu hinterfragen in der Lage sind, etwa die von Judith Fehrer vorgestellten Beispiele einer Widerlegung von Ko-Evolution in zwei Fällen, die Isolierung von DNA aus Dinosaurierknochen oder von lebensfähigen Bakteriensporen, die in Bienenkörpern in Bernstein gefunden wurden (Beiträge von Harald Binder). Sind die DNA-Isolate aus Fossilien „echt"? Sind sie vielleicht eine Anfrage an die etablierten Altersvorstellungen? Werden Hilfshypothesen gesucht, um Gewohntes beibehalten zu können oder werden diese Befunde früher oder später in Vergessenheit geraten wie einst die von Menschen angefertigten Werkzeuge, die Cremo und Thompson wieder „ausgegraben" haben?

In diesem Sinne will Studium Integrale *journal* einen Beitrag dazu liefern, daß in etablierten Sichtweisen zur Zeit unberücksichtigte Daten nicht achtlos in „Schubladen" gesteckt oder gar verdrängt werden.

Ihre Redaktion Studium Integrale *journal*

Das neue Bild von der Ozeankruste

Thomas Fritzsche, Bahnhofstr. 2, D-37139 Adelebsen

Zusammenfassung: **Die Vorstellungen vom Bau und der Beständigkeit ozeanischer Kruste haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend gewandelt. Die Ozeanbecken sind nicht die uralten Sammelbecken kontinentaler Abtragungsprodukte, sondern im Vergleich zu den Kontinenten relativ junge Gebilde. Mit dem Aufkommen einer neuen Leittheorie, dem Seafloor-Spreading und der Plattentektonik (Kontinentalverschiebung), haben sich die Geowissenschaftler verstärkt der Erforschung der Ozeankruste gewidmet. Neben den vielfältigen Bestätigungen der Plattendrift ergaben sich aber auch unerwartete Einblicke in das dynamische Geschehen auf der Erde. Vor allem die Entdeckung aktiver hydrothermaler Zirkulationssysteme in der Ozeankruste werfen neues Licht auf die Entstehung von Erzlagerstätten und liefern außerdem neue Einsichten in die Prozesse der Wärmeabführung und der globalen Stoffkreisläufe unseres Planeten.**

Einführung und historisches Umfeld

Viele Jahrhunderte lang war das geologische Weltbild geprägt von den Objekten der unmittelbaren Anschauung, von Bergen und Tälern, von Flußläufen und Meeresküsten, von Gesteinen und Erzen. Wurden die Fossilien als ehemalige Lebewesen gedeutet, wies ihr Vorkommen auf dem Festland oder sogar im Gebirge auf einstige Meeresbedeckung oder Überflutungen hin. Folglich ging in zahlreiche Erdtheorien die Vorstellung von einem Wechsel zwischen Land und Meer ein: Meeresboden wird einmal aufsteigen und zu Festland werden, Kontinente werden absinken und überflutet werden. Schon wenige Jahrhunderte nach Christus wurden die Fossilien im Zusammenhang mit dem biblischen Sintflutbericht gesehen; im 17. und 18. Jahrhundert war die Sintflut das zentrale Element erdgeschichtlicher Theorien. Aber auch mit der Ablehnung der Sintflut als prägendem geologischen Ereignis blieb den Geologen der Zugang zum größeren Teil der Erdoberfläche verwehrt: sie lag unzugänglich unter einer mehrere Tausend Meter tiefen Wasserschicht.

Seit Beginn der Neuzeit waren die Verteilung der Kontinente und die Ausdehnung der Meere im großen und ganzen bekannt. Damals rätselte man, warum so gewaltige Flächen der Erde praktisch unbewohnbar waren, hatte der Schöpfer die Erde doch gerade für den Menschen gemacht. Wiederholt gab es in der Folgezeit Ansätze, die Verteilung und das Auseinanderreißen der Kontinente als Auswirkungen der biblischen Sintflut zu deuten (so von Burnet 1681, Lilienthal 1756 und Snider 1858; nach Gould 1992 und Sullivan 1980). Dennoch wurden in der Geologie horizontale Bewegungen von größerem Ausmaß im allgemeinen abgelehnt. Die Meeresbecken sollten fast über die gesamte Erdgeschichte hinweg existiert haben, man sprach von der Permanenz der Ozeane (Pettersson 1954). Um die Verteilung von Flora und Fauna auf den Kontinenten zu erklären, wurden Landbrücken angenommen. Die jährliche Sedimentfracht der Flüsse sollte sich im Verlaufe der unermeßlichen geologischen Zeiträume in den Ozeanbecken angesammelt haben. Die Ozeane galten als unendlich tief.

Im 19. Jahrhundert entstand durch die Suche nach Verlegerouten für Tiefseekabel jedoch erhöhtes Interesse am Meeresgrund; die Tiefen der Meere wurden ausgelotet und Sedimentproben vom Meeresboden heraufgezogen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeichnete sich mit der Kontinentalverschiebungs-Theorie von Alfred Wegener bereits das dynamische Bild vom Geschehen in und auf der Erde ab, das heute die Geowissenschaften in den unterschiedlichsten Forschungsrichtungen prägt. Es dauerte aber noch einige Jahrzehnte, bis sich die Vorstellungen von der Ozeanausdehnung und der Kontinentaldrift durchsetzen konnten. Heute sind viele geowissenschaftliche Disziplinen von dieser umfassenden Neuorientierung durchdrungen.

Expeditionsfahrten

Die Forschungsfahrten der H.M.S. *Challenger* von 1872-1876 erbrachten erstmals einen Überblick über die Sedimentbedeckung des Meeresbodens; die Begriffe für die vom Meeresboden heraufgezogenen Sedimente gelten z. T. bis heute (Tab. 1). Neben den Sedimenten wurden aber auch vulkanische Gesteine entdeckt und dazu noch die sog. Manganknollen. Die Angabe über die Tiefe, bis zu der Lebewesen existierten, mußte von 550 m (von Forbes aus dem Jahr 1841) drastisch auf jetzt viereinhalb Kilometer erweitert werden.

Tab. 1: Gliederung und Verbreitung der wichtigsten Meeresablagerungen.

	Tiefe in Metern	% d. Weltmeere
Blauschlick	200-2700	15
Globigerinenschlamm	2000-5000	36
Roter Ton (red clay)	ab 5000	28

Der Globigerinenschlamm (ein Tiefsee-Sediment mit hohem Karbonatgehalt) bedeckt 36% der Weltmeerfläche, das entspricht etwa 25% der Fläche der Erde (aus Brinkmann 1984).

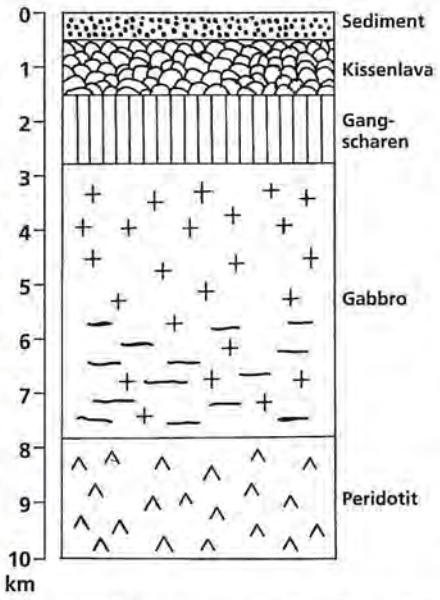


Abb. 1: Der Aufbau der ozeanischen Kruste, wie er sich aus den Ophiolithen ableiten läßt. Unter einer dünnen Sedimentschicht folgen die Pillow- oder Kissenlaven, deren Form charakteristisch für ein Ausfließen auf dem Boden eines Meeres ist. Darunter sind dann die Gangscharen (sheeted dikes) aus Basalt, unterlagert vom Tiefengestein der gleichen chemischen Zusammensetzung, dem Gabbro. Im unteren Teil ist der Gabbro aufgrund von Fließbewegungen lagig und geht in den Peridotit des Erdmantels über. Die Dicke der ozeanischen Kruste schwankt um einige Kilometer, an den Mittelozeanischen Rücken ist sie noch recht dünn. In den Ophiolithen können einige der hier skizzierten Glieder fehlen oder sie sind stark umgewandelt.

Zwischen 1925 und 1927 unternahm das deutsche Forschungsschiff *Meteor* eine Fahrt in den Südatlantik. Erstmals wurden mit Hilfe des Echolots akustische Messungen vorgenommen und ein Teil der Meeresboden-Topographie genauer erfaßt. Dabei stellte man fest, daß der Ozeanboden keine reliefflose Ebene ist; das Meerwasser verwehrt lediglich den Blick auf submarine Gebirge von gewaltigen Ausmaßen. Aus den Sedimenten wurden Bohrkerne von bis zu 1 m Länge gewonnen; erstmals konnten die Schichtung der Ablagerungen untersucht und Aussagen über die jüngste Klimageschichte im Quartär gemacht werden (SEIBOLD 1974; KENNETT 1982).

Unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg wurden weitere Expeditionen, u.a. von der schwedischen *Albatross* (1947-48; PETTERSSON 1954), durchgeführt. Eine neue Phase der Informationsgewinnung begann 1968 mit der ersten Fahrt des Bohr- und Forschungsschiffes *Glomar Challenger* im Rahmen des Deep Sea Drilling Project (DSDP). Anfangs nur als amerikanisches Projekt gestartet, schlossen sich in den 70er Jahren weitere Staaten den Forschungskampagnen an (International Phase of Ocean Drilling – IPOD). Nach dem Abschluß der Bohrungen mit der *Glomar Challenger* im Jahr 1983, begann im Januar 1985 das Folgeprojekt unter der Bezeichnung ODP (Ocean Drilling Program) mit dem Bohrschiff *Joides Resolution.*

Besonders die Resultate der Tiefseebohrungen haben zum Verständnis erdgeschichtlicher Zusammenhänge beigetragen, wobei der Erforschung der jüngsten Ablagerungen ein unmittelbarer Bezug zu den Umweltproblemen der Gegenwart (Treibhauseffekt durch erhöhten Kohlendioxidausstoß, Ozonloch) zukommt (BEIERSDORF 1991). Die beginnende Klimaveränderung im Tertiär zeigt sich auf verschiedene Weise in den Bohrkernen. Die Untersuchung der Mikrofossilien in den Sedimenten und die Messung der „eingefrorenen" Magnetfeld-Umpolungen haben zu einer Verfeinerung der Stratigraphie (Schichtenfolge) geführt.

Wie schon seit der Anerkennung der Kontinentaldrift erwartet, erwies sich die Sedimentdecke auf dem Meeresboden als relativ dünn. Nach seismischen Untersuchungen wird eine mittlere Sedimentdicke von 500 m angenommen; früher, als man die Ozeanbecken für sehr alt hielt, hatte man mit einer Mächtigkeit von 2-3 km gerechnet. Am Rand der Kontinente, wo große Sedimentmengen eingetragen werden, können die Ablagerungen jedoch viele Kilometer mächtig sein; so an vielen Stellen im Atlantik.

Unter den Sedimenten folgt eine Basaltschicht von etwa 2 km Mächtigkeit, darunter eine Schicht aus dem Tiefengestein Gabbro. Bereits in 6-7 km Tiefe beginnt der Erdmantel (siehe Abb. 1). Die tiefste Bohrung (DSDP Hole 504 B) in die ozeanische Kruste erreichte zunächst eine Tiefe von 1.562 m; Anfang 1993 wurde das Bohrloch erneut aufgesucht und bis zu einer Tiefe von 2.111 m erweitert. Damit ist man unmittelbar in die Grenzzone zwischen den Gangscharen und dem Gabbro vorgedrungen (ALT, KINOSHITA, STOKKING et al. 1993).

Das moderne Bild von der Ozeankruste

Beim Blick auf die Topographie des Meeresbodens lassen sich drei Großformen unterscheiden: die Kontinentalränder, die Tiefseebecken einschließlich der Tiefseerinnen und die Mittelozeanischen Rücken. Die Kontinentalränder sind noch den Kontinenten zuzurechnen. Mit einer durchschnittlichen Tiefe von 200 m ist der obere Bereich des Kontinentalrandes, der Schelf, der unter den Meeresspiegel getauchte äußere Saum der Kontinente. Werden während einer Eiszeit größere Mengen des Meerwassers in kontinentalen Gletschern oder Eispanzern gebunden, sinkt der Meeresspiegel und legt Teile der Kontinentalränder frei. Den eigentlichen Übergang vom Festland zum Meeresbecken bildet der mit 4 Grad Neigungswinkel relativ steile Kontinentalabhang.

Die Mittelozeanischen Rücken sind ein fast durchweg untermeerisches, weltumspannendes Gebirgssystem von ca. 65.000 km Länge – und damit länger als der Erdumfang (Abb. 5). Auffällig ist die zentrale Lage des Mittelatlantischen Rückens, der Europa und Afrika von Nord- und Südamerika trennt. Nach dem Modell der Plattentektonik sind die Mittelozeanischen Rücken Plattengrenzen und Produktionsstätten neuer ozeanischer Lithosphäre. Die beiden angrenzenden Platten driften an diesen Stellen mit Geschwindigkeiten von bis zu 20 cm/Jahr auseinander. Zur Kompensation dringt an vielen Stellen unter den Rücken basaltische Gesteinsschmelze auf, kühlt ab und wird an die Kruste angeschweißt.

Die Rücken erheben sich bis zu 3 km über den Boden der Tiefsee und sind bis zu einigen Tausend

Kilometer breit. Zu beiden Seiten fallen die Rücken flach ab und gehen in die Tiefseebecken über; diese liegen im Schnitt 4-6 km unter der Meeresoberfläche, während die durchschnittliche Tiefe der Ozeane insgesamt rund 3.800 m beträgt. Ein markantes Muster des submarinen Gebirges sind die sog. Transformstörungen. Nach jeweils einigen Dutzend Kilometern endet jeder Rückenteil abrupt. Die Fortsetzung findet man an einer Stelle, die bis zu mehreren 100 km seitlich versetzt sein kann.

Nimmt man die heutige Rate der Krustenbildung als Maß, so würde in rund 250 Millionen Jahren soviel neue ozeanische Kruste erzeugt, wie sie der gesamten Erdoberfläche entspricht. Vergegenwärtigt man sich die radiometrischen Datierungen kontinentalen Gesteins, die auf ein Alter von rund 4 Milliarden Jahren weisen, so liegt hier ein krasses Mißverhältnis vor.

Als Erklärung wird der „Verzehr" ozeanischer Lithosphäre angenommen, wie er offenbar in den sog. Subduktionszonen erfolgt. Subduktionszonen stellen eine andere in den Ozeanen verbreitete Form von Plattengrenzen dar (Abb. 2). So besteht z.B. der Rand des Pazifiks zu etwa drei Vierteln aus solchen Strukturen. Die erkaltete und damit relativ schwere ozeanische Lithosphäre taucht dort, z.T. über Tausende von Kilometern hinweg, schräg unter die angrenzende Platte ab. Das Verschwinden der Platten geschieht nicht geräuschlos: So kann man den Weg der Platten ins Erdinnere hinein anhand von Erdbeben-Hypozentren verfolgen. Tatsächlich erhöht sich die Tiefe der Hypozentren mit der Distanz zur Knicklinie, der sog. Tiefseerinne, maximal bis zu 700 km. In den Subduktionszonen kommt es teilweise zur Aufschmelzung und Vermischung ozeanischer und kontinentaler Kruste. Gesteinsschmelzen verschiedener Herkunft und mit verschiedenem Chemismus steigen auf und treten an Vulkanen als Lava aus oder erkalten in der Erdtiefe zu kristallinem Gestein. Die häufigen und starken Erdbeben (z.B. im Japanischen Inselbogen) und der ausgeprägte Vulkanismus rund um den Pazifik („Pazifischer Feuerring") sind Ausdruck der mit der Subduktion verknüpften Prozesse.

Auf dem Ozeanboden finden sich Tausende meist konisch geformter submariner Berge, die sog. Seeberge, Guyots oder Seamounts; sie entstanden durch vulkanische Prozesse. Die Vulkanberge auf der Ozeankruste müssen nicht unmittelbar mit den Vorgängen an den Mittelozeanischen Rücken zusammenhängen. Z.B. ist der Vulkanismus auf Hawaii durch einen Hot Spot oder Manteldiapir bedingt: An bestimmten Stellen auf der Erde dringt heißes Material aus großer Tiefe hervor und brennt sich regelrecht durch die äußere Erdschale. Auf den Hawaii-Inseln ist die höchste Erhebung der Erde: Der Vulkanbau des Mauna Kea erhebt sich fast 10.000 m über den Ozeanboden, davon liegen 4,2 km über dem Meeresspiegel.

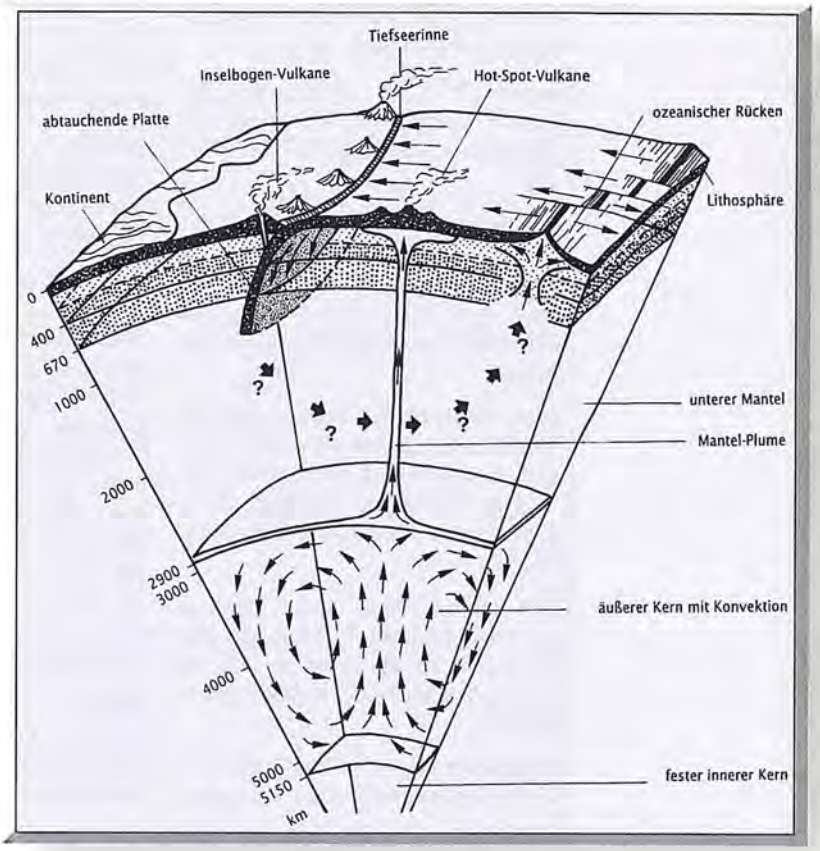


Abb. 2: Die Abbildung verdeutlicht wichtige Prozesse der Kontinentaldrift. An den ozeanischen Rücken wird ständig neue Kruste erzeugt und wandert zur Seite. Die Tiefseerinnen und die mit ihnen verknüpften Inselbogen-Vulkane kennzeichnen den Bereich abtauchender Kruste, die Subduktionszone. Dahinter folgt das Back-arc-Becken und dann der Kontinent. Vermutlich werden die Platten von einem Konvektionssystem im Erdmantel bewegt. Auch im äußeren Erdkern (zwischen 2.900 und 5.100 km Tiefe) scheint es Konvektionsströme zu geben, die als Ursache des erdmagnetischen Feldes angesehen werden. (Nach: Klaus Strobach: Erdbebenforschung und Physik des Erdinnern. In: Geowissenschaften in unserer Zeit, Nr. 1, 1985).

Ophiolithe – gestrandete Ozeankruste

Die aus dem Modell des Seafloor-Spreading heraus entwickelte Vorstellung von einem ständigen Anschweißen neuer Ozeankruste beidseits der mittelozeanischen Spreizungszonen und ihrem „Verbrauch" in den Subduktionszonen erklärt den Mangel an ozeanischen Ablagerungen auf dem Festland. Zwar sind viele Sedimentgesteine auf den Kontinenten einst in Meeren gebildet worden, doch handelte es sich dabei meist um Ablagerungen in relativ flachen Meeren, etwa dem heutigen Kontinentalschelf vergleichbar. Entsprechende Tiefseeablagerungen sind nicht bekannt oder ihre Deutung doch zumindest umstritten. Anders ist die Situation bei den sog. Ophiolithen, das sind Komplexe ozeanischer Kruste, die gewissermaßen auf die Kontinente hinaufgetragen, obduziert, wurden (Kerr 1983, Nicolas 1989).

Ozeanische Lithosphäre wird mit zunehmendem Abstand vom Ort ihrer Entstehung kühler, dichter und dicker. Ist die Kruste andererseits noch jung und dünn (und wegen der höheren Temperatur

Glossar

Back-arc-Becken: Ozeanbecken, das hinter dem vulkanischen Inselbogen einer Subduktionszone liegt.

Basalt: Häufiges Vulkangestein mit rund 50 % SiO_2. Das dem Basalt entsprechende Tiefengestein heißt Gabbro.

Hypozentrum: Bezeichnung für den Erdbebenherd. Der Punkt an der Erdoberfläche senkrecht über dem Herd heißt Epizentrum; dort tritt das Beben meist am stärksten in Erscheinung.

Jura: Geologisches System zwischen Trias und Kreide. Bekannte Ablagerungen aus der Jurazeit sind z.B. die Solnhofener Plattenkalke, in denen u.a. die *Archaeopteryx*-Exemplare gefunden wurden.

Lithosphäre: Bezeichnung für die starre äußere Schale der Erde. Sie ist im Mittel 100 km dick und umfaßt die Erdkruste sowie einen Teil des oberen Mantels.

Manganknollen: Knollige Gebilde mit einem konzentrisch-schaligen Aufbau. Neben Eisen und Mangan enthalten sie auch nennenswerte Mengen an Kobalt und Nickel. Weite Teile des Meeresbodens im Atlantik und besonders im Pazifik sind mit Manganknollen übersät.

Quartär: Jüngstes geologisches System. Ins Quartär fällt beispielsweise die Hauptphase der nordeuropäischen Vereisung.

Radiometrische Datierungen: Einige Isotope bestimmter chemischer Elemente zerfallen mit einer konstanten Rate zu anderen Isotopen. Wenn diese Rate auch in der Vergangenheit gültig war, lassen sich aus den Isotopenverhältnissen und plausiblen Annahmen über ihre anfängliche Konzentration Gesteinsalter errechnen. Diese Alter werden auch als „absolute Alter" bezeichnet; die Altersangaben bedürfen aber in jedem Fall noch einer Überprüfung auf ihre Verträglichkeit mit den geologischen Verhältnissen.

Tertiär: Geologisches System zwischen Kreide und Quartär. Ein Ereignis in der Tertiärzeit ist z.B. die Entstehung der Alpen.

auch von geringerer Dichte), kann sie der Subduktion widerstehen. Es ist dann vorstellbar, daß sie bei gegenläufigen Bewegungen der Lithosphärenplatten abgehobelt und auf den Kontinent aufgeschoben wird. Dieser Vorgang ist zwar einleuchtend, doch ist leider kein rezentes Beispiel bekannt, wo er gerade stattfindet und vielleicht erforscht werden könnte (NICOLAS 1995).

Untersuchungen von mittlerweile über hundert anerkannten Ophiolithkomplexen weisen auf ein Spektrum von Entstehungsbedingungen. So müssen die Gesteinsserien der Ophiolithe einst nicht ausschließlich an Mittelozeanischen Rücken gebildet worden sein; wahrscheinlicher ist in vielen Fällen eine Entstehung in Back-arc-Becken, die über einer Subduktionszone liegen. Oft sind die Ophiolithe als Folge ihrer bewegten Geschichte nur unvollständig erhalten oder deformiert. Daß sie mit den Plattenkollisionen zusammenhängen, ergibt sich auch aus ihrer weltweiten Verteilung: meist liegen sie am Rand der Kontinente.

Der Oman-Ophiolith auf der Arabischen Halbinsel ist mit rund 500 km Länge und 50-100 km Breite der größte Komplex und außerordentlich gut erhalten; da er heute in einer Wüstenregion liegt und demzufolge nicht von einer Vegetationsdecke überzogen ist, kann er besonders gründlich erforscht werden. Er zeigt die Abfolge, die auch für die Ozeankruste typisch ist (Abb. 1 und 3). Es bleibt allerdings anzumerken, daß die Gesteine durch ihren Aufstieg und den Kontakt mit dem Meerwasser und der Atmosphäre eine Veränderung erfahren haben; beispielsweise sind die Peridotitgesteine des oberen Mantels zu Serpentiniten umgewandelt, da einzelne Minerale Wasser in ihre Kristallstruktur eingebaut haben.

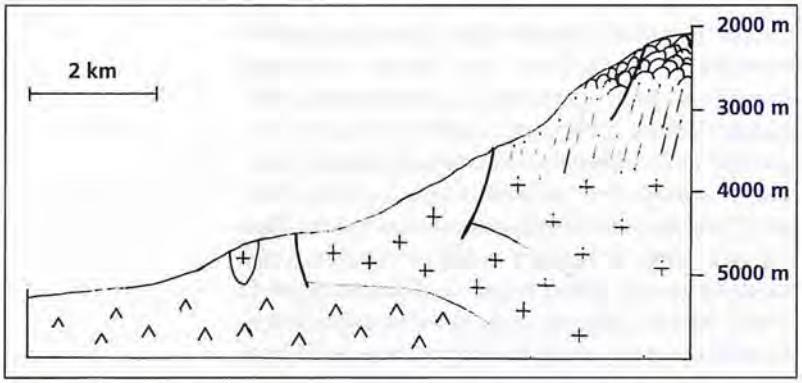


Abb. 3: An den Transformstörungen finden sich kilometerhohe Versetzungen der ozeanischen Kruste. Deshalb war es möglich, mit einem Tauchboot Proben von einer untermeerischen Gesteinswand an der Vema Bruchzone zu sammeln und eine geologische Profilaufnahme zu erstellen. Dabei konnte der von den Ophiolithen und den Bohrungen bekannte Aufbau bestätigt werden. Die Vorgänge, die u.a. dazu beigetragen haben, daß sogar der Erdmantel auf dem Meeresboden zugänglich ist, lassen sich im einzelnen noch nicht nachvollziehen. Von links nach rechts handelt es sich um die gleiche Folge wie in Abb. 1: Peridotit, Gabbro, basaltische Gangscharen und Kissenlaven (vereinfacht nach AUZENDE et al. 1989).

Hydrothermale Zirkulation

Mitte der 60er Jahre wurden am Grund des Roten Meeres warme Salzlaugen und reichhaltige Erzabscheidungen entdeckt. Damit zeichnete sich ab, daß zumindest im Anfangsstadium des Auseinanderbrechens von Kontinenten hydrothermale Prozesse die Entstehung von Erzlagerstätten ermöglichen. Kurze Zeit später wurden dann auch am Ostpazifischen Rücken Erzabscheidungen entdeckt, die sich offenbar aus heißen Lösungen gebildet hatten. Im Rahmen des Transatlantic Geotraverse Project (TAG) stieß man am Mittelatlantischen Rücken auf warme Quellen. Schließlich wurden 1977 vom Galapagos Spreading Center warme Quellen und eine interessante Fauna aus Röhrenwürmern, Krabben, Garnelen und Muscheln beschrieben. Am Beginn der Nahrungskette stehen nicht photosynthetische Organismen, sondern chemosynthetische Bakterien, die die entweichenden Sulfide oxidieren (KARL et al. 1980; MACDONALD & LUYENDYK 1981; RONA &

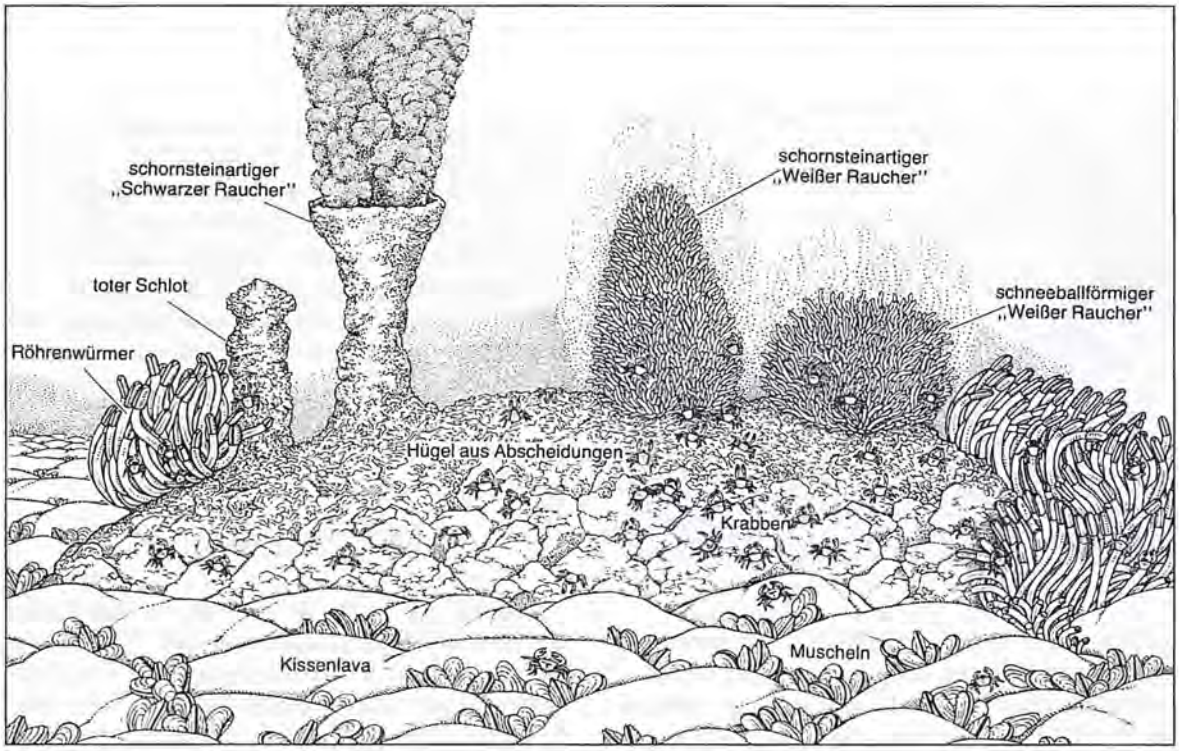


Abb. 4: Unmittelbar neben den Schwarzen Rauchern, in den Zonen hydrothermaler Zirkulation, fristet eine eigentümliche Fauna ihr Dasein. Krabben, Garnelen, dezimetergroße Muscheln und Krabben sind an diese unwirkliche Welt angepaßt. © Spektrum der Wissenschaft. (Aus: Ken C. MACDONALD & Bruce LUYENDYK: Tauchexpeditionen zur Ostpazifischen Schwelle. In: Spektrum der Wissenschaft, Juli 1981. Abdruck mit freundlicher Genehmigung.)

THOMPSON 1993; siehe Abb. 4).

Bei einer Tauchfahrt des Forschungs-Unterseebootes *Alvin* zum Ostpazifischen Rücken (in der Nähe des Eingangs zum Golf von Kalifornien) gelang dann im Frühjahr 1979 die sensationelle Entdeckung: Aus einem meterhohen Schlot strömen dunkle Rauchwolken, von den Forschern spontan „black smoker" (Schwarzer Raucher) genannt. Wegen des hohen Druckes in rund 2.600 m Tiefe verdampfen die heißen Lösungen nicht. Auch die vom Galapagos Ridge beschriebene Fauna, die in völliger Dunkelheit lebt, wird von der Besatzung des Tauchbootes im Scheinwerferlicht ausgemacht (SPIESS et al. 1980). Im Jahr 1985 wurden die gleichen Schlote und eine angepaßte Fauna auch am Mittelatlantischen Rücken entdeckt. Weitere solcher Erscheinungen, bezeichnet als hydrothermale Felder, fand man inzwischen im Indischen Ozean und im westlichen Pazifik (Abb. 5).

Wie lassen sich die chemischen und physikalischen Prozesse, die zur Freisetzung und Abscheidung der Stoffe führen, verstehen? In der abkühlenden und langsam auseinanderdriftenden Kruste entstehen aufgrund thermischer Spannungen Klüfte, in die kaltes Meerwasser hineinströmt; von den Ophiolithen ist bekannt, daß solche Klüfte mehrere Kilometer weit in die Kruste hineinreichen, vermutlich sogar bis in den Erdmantel. Befindet sich in geringer Tiefe eine Magmakammer, wird das Meerwasser auf mehrere hundert Grad erhitzt. Ein Teil der im Wasser gelösten Stoffe, hauptsächlich Magnesium- und Sulfationen, reagieren mit dem durchlässigen Gestein. Durch die Freisetzung von Wasserstoff-Ionen wird aus dem alkalischen Meerwasser eine saure Lösung, die verschiedene Metalle (Eisen, Mangan, Zink, Lithium, Kalium, Calcium, Barium, Kupfer) aus dem heißen Gestein herauslöst.

Aus kaltem und metallarmem Meerwasser ist jetzt ein heiße, aggressive und metallbeladene Lösung, eine hydrothermale Lösung, geworden. Sie strömt von der Wärme getrieben bis an die Oberfläche des Meeresbodens, wo sie oft mit einigen 100°C austritt. Durch den Kontakt mit dem nur 2-4 Grad kalten Meerwasser wird die Lösung schlagartig abgeschreckt und es fallen zahlreiche Metalle als Sulfide aus. Dieser Reaktion verdanken die Schwarzen Raucher ihren Namen. An den Auslaßventilen, Schornsteinen oder Schloten („vents") setzen sich zunächst Sulfate ab; dabei handelt es sich vorrangig um das Mineral Anhydrit. Der Schornstein kann dabei zwischen 1 und 10 cm pro Tag in die Höhe wachsen. Im weiteren Verlauf werden die Anhydrit-Minerale von den Metallsulfiden ersetzt. Die Größe der Schlote kann zwischen wenigen Zentimetern und mehreren Dutzend Metern betragen (VON DAMM 1990).

Der Eintrag chemischer Stoffe in die Ozeane durch die hydrothermale Entladung liegt für einige Metalle in der Größenordnung des Eintrags vom Festland durch die Flüsse. Besonders die Metalle Eisen und Mangan werden von den Auslaßventilen der Kruste in die Ozeane gefördert; damit scheint auch die Stoffzufuhr für die Bildung der Manganknollen geklärt zu sein. Unklar ist zur Zeit noch die chemische Bilanz für das Element Natrium; man kann auf jeden Fall davon ausgehen, daß mit der Umwandlung der ozeanischen Kruste vermehrt Natrium in diese eingebaut wird. Die intensive Auslaugung der Kruste durch zirkulierende Lösungen hat auch ein völlig neues Licht auf die Entstehung von Erzlagerstätten geworfen: Möglicherweise sind viele präkambrische Sulfiderze auf derartige Prozesse zurückzuführen (RONA 1986).

Die Schwarzen Raucher wurden anfangs als nur kurzfristig aktive Schornsteine angesehen. Die Intensität der Wärmeabführung sollte zum raschen Erkalten der Lösungen und zur Verstopfung der Förderwege führen. Mittlerweile konnte aber festge-

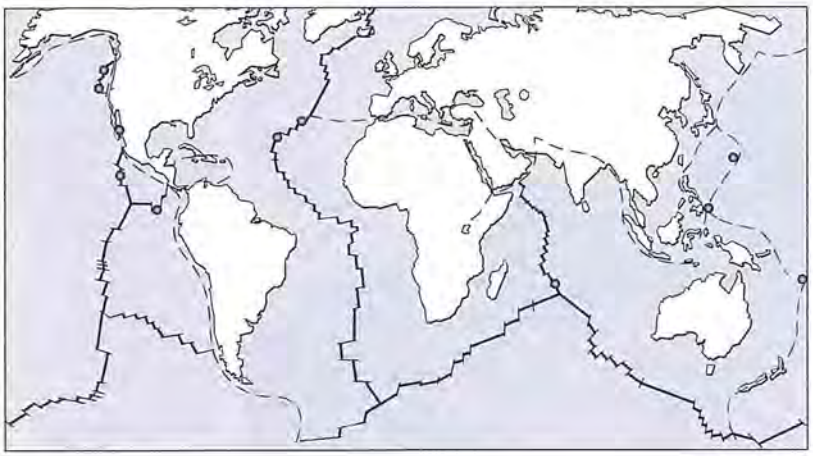


Abb. 5: Auf dieser Weltkarte sind der Verlauf und das Ausmaß der Mittelozeanischen Rücken (starke Linien) schematisch dargestellt. Mit gestrichelten Linien sind die Plattengrenzen angedeutet, die nicht entlang der Rücken oder Tiefseerinnen verlaufen. Mit Punkten sind die Stellen in den Ozeanen gekennzeichnet, wo man in den letzten 15 Jahren hydrothermale Felder entdeckt hat. In den einzelnen Punkten sind meist mehrere Stellen zusammengefaßt.

stellt werden, daß die chemische Zusammensetzung der geförderten Lösung zumindest in einem Beobachtungsgebiet über sieben Jahre nahezu gleich blieb, die Schwarzen Raucher also Ausdruck eines langfristigen Gleichgewichtes sind (EMBLEY et al. 1994). Trotz der Konstanz einzelner Förderwege herrschen zwischen den verschiedenen Förderfeldern doch Unterschiede, oft auch zwischen den Schloten eines Feldes. Die Beobachtungen lassen sich nicht mit einem einzelnen Konvektionssystem erklären, bei dem frisches Meerwasser bis unmittelbar an die Magmakammer herandringt. Vermutlich liegen zwei Konvektionsregime übereinander: Im unteren zirkuliert eine Salzlauge bei 400-700°C, die im Wärme- und Stoffaustausch mit einem oberen Regime steht, in dem die Temperaturen nur knapp über 350°C liegen. Die Verweildauer des Wassers im oberen Regime beträgt wahrscheinlich weniger als 3 Jahre (BISCHOFF & ROSENBAUER 1989).

Im August 1986 konnte an einem Teil des Ostpazifischen Rückens, dem Juan de Fuca Ridge, eine größere Wärmeentladung beobachtet werden. Bei dieser Wolke („megaplume") handelte es sich um eine kurzfristige Erscheinung; einen Monat später war bei einer erneuten Tauchfahrt nichts mehr von ihr nachzuweisen. Die freigesetzte Wärme entsprach der 200-2000 fachen Wärmemenge, die sonst von einem Feld während eines Jahres abgegeben wird. Allerdings war das Verhältnis des Helium-Isotops mit der Massenzahl 3 zur Wärme erhöht und sank erst in den nächsten Jahren wieder auf den normalen Wert (BAKER & LUPTON 1990). Das Helium kann nur aus dem Erdmantel stammen; deshalb wird die Erhöhung auf magmatisch-tektonische Vorgänge im Untergrund zurückgeführt. Vermutlich ist Magma aus dem Erdmantel vorgedrungen, hat die Kruste gedehnt und einen Teil der im Magma gelösten Gase an das hydrothermale Zirkulationssystem abgegeben.

Erstmals wies ELDER (1965) auf einen möglichen Kühlmechanismus durch ein mittelozeanisches Kluftsystem hin. In die Klüfte einsickerndes Wasser würde erklären, warum der Wärmefluß an einigen Stellen der Rücken ausgesprochen niedrig ist. Noch vor der Entdeckung aktiver Schwarzer Raucher haben WOLERY & SLEEP (1976) errechnet, daß das gesamte Wasser der Ozeane in 5-11 Millionen Jahren theoretisch einmal durch das Kluftsystem der ozeanischen Kruste fließt. Möglicherweise ist der Kühleffekt noch wirkungsvoller, als damals angenommen. Jedenfalls geht man heute davon aus, daß rund 25 % des gesamten Wärmeflusses der Erde über diese hydrothermalen Mechanismen erfolgen (LOWELL et al. 1995).

Wertung und Ausblick

Die Bedeutung der hydrothermalen Prozesse für die globalen Stoffumsetzungen und den Wärmehaushalt der Erde sind erst seit weniger als zwei Jahrzehnten erkannt. Zur Zeit sind knapp 10% der Ozeanrücken näher untersucht, und die Forscher sind auf weitere Überraschungen gefaßt (LOWELL et al. 1995). In den nächsten Jahren werden von dreidimensionalen numerischen Modellen zusätzliche Erkenntnisse über die Zirkulation der hydrothermalen Lösungen erwartet. Wenn genügend quantitative Daten vorliegen, wird sich die Frage nach den Überresten und der Intensität der gleichen Prozesse in der Erdvergangenheit stellen. Sicherlich zeugen die Ophiolithe von einer älteren ozeanischen Kruste mit annähernd dem gleichen Aufbau wie die heute gebildete. Doch die Ophiolithentstehung scheint von Zeit zu Zeit verstärkt aufzutreten (NICOLAS 1995, S. 190), z. B. während der Aufspaltung des Superkontinents Pangäa in der Jurazeit.

Wo waren damals aber die ozeanischen Rücken? Gab es sie in gleicher Ausdehnung wie heute? Wie wurde die Erdwärme abgeführt? Staute sie sich unter dem Superkontinent an und führte zu dessen Aufspaltung? Gegenwärtig können viele solcher Fragen erst angedacht werden, da unsere Kenntnisse vom derzeit ablaufenden Geschehen noch unvollkommen sind; die Übertragung in die Vergangenheit ist auch deshalb so schwierig, weil viele Zeugnisse erdhistorischer Prozesse unwiederbringlich zerstört wurden oder in die Tiefe gesunken sind.

Die Ergebnisse der Ozeankrustenerkundung sind bestens geeignet, einige Grundprobleme geowissenschaftlicher Forschungstätigkeit, ja von Forschung überhaupt, zu beleuchten.

Zunächst einmal sind die Ergebnisse abhängig von der Untersuchungsmethode, also „vom Stand der Technik" und ihrer Verfügbarkeit. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Forschung durch die Umwandlung militärischer Einrichtungen für zivile Zwecke begünstigt (NICOLAS 1995). Die Erkundung der Topographie des Meeresbodens und die Entdeckung der magnetischen Streifenmuster (das wechselnde Magnetfeld der Erde ist in den Gesteinen „gespeichert"), die schließlich den Ausschlag

zur Anerkennung der Kontinentalverschiebung gaben, sind letztlich Ableger dieser Entwicklung. Die faszinierenden Bilder von den Schwarzen Rauchern und der eigentümlichen Fauna waren erst durch die gezielte Suche mit bemannten Unterseebooten möglich; einige Beobachtungen beruhten schlicht auf Zufall.

Daß die Erkundung des Meeresbodens ab den 60er Jahren intensiviert wurde, hängt zum zweiten mit der neuen Leittheorie der Plattentektonik zusammen. Die Mittelozeanischen Rücken, die postulierten Plattenränder und Subduktionszonen rückten nun ins Zentrum des Interesses; die Beobachtungen, Meßresultate und neuen Deutungen leiten sich unmittelbar aus den Fragen und Anforderungen der Plattentektonik ab. Eine derart theoriegeleitete Forschung mag mit der Vorstellung von voraussetzungsloser Wissenschaft vordergründig nicht viel gemein haben, aber aus einer anderen Perspektive heraus betrachtet ist diese Vorgehensweise verständlich: Forschung ist nun einmal teuer, und niemand wird in unbegründete Projekte investieren. Folglich orientieren sich viele Untersuchungen an der aktuellen Entwicklung innerhalb eines Fachgebietes. In der Regel erfährt die ursprüngliche Leittheorie zahlreiche Modifikationen. Die Erforschung der ozeanischen Kruste im Rahmen der Plattentektonik ist hierfür ein treffendes Beispiel.

Die wandernden Lithosphärenplatten und die gebündelte Wärmeabführung an den ozeanischen Rücken zeichnen ein ausgesprochen dynamisches Bild von den Vorgängen auf der Erde. Im übertragenen Sinne gilt diese Dynamik auch für die allgemeine Lage der geowissenschaftlichen Disziplinen. Kein Teilgebiet kann unter dem Vermerk der gesicherten Erkenntnis ausgegliedert und für die Zukunft festgeschrieben werden. Unsere Generation steht somit vor anspruchsvollen und spannenden Forschungsaufgaben – und vielen unerwarteten Resultaten.

Dank: Bei Franz Egli-Arm, Ingo Heppner und einem weiteren Gutachter möchte ich mich ganz herzlich für die Durchsicht des Manuskripts und die wertvollen Verbesserungsvorschläge bedanken. Hanna Jordan danke ich für die Erstellung der Abbildung 5.

Literatur

Alt JC, Kinoshita H, Stokking LB et al. (1993): Costa Rica Rift. – 2. Site 504. Proc. ODP, Init. Repts. *148*, 27–84.

Auzende JM, Bideau D, Bonatti E, Cannat M, Honnorez J, Lagabrielle Y, Malavieille J, Mamaloukas-Frangoulis V & Mevel C (1989) Direct observation of a section through slow-spreading oceanic crust. Nature *337*, 726-729.

Baker ET & Lupton JE (1990) Changes in submarine hydrothermal ^{3}He/heat ratios as an indicator of magmatic/tectonic activity. Nature *346*, 556-558.

Beiersdorf H (1991) Mit wissenschaftlichen Tiefseebohrungen ins nächste Jahrhundert. Mitteilung XX der Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung; VCH, Weinheim.

Bischoff JL & Rosenbauer RJ (1989) Salinity variations in submarine hydrothermal systems by layered double-diffusive convection. Jour. Geology *97*, 613-623.

Brinkmann R (1984) Allgemeine Geologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Elder JW (1965) Physical processes in geothermal areas. In: Lee WHK (Hrsg.) Terrestrial heat flow. AGU Geophysical Monograph Series *8*, S. 211-239; Washington.

Embley RW, Feely RA & Lupton JE (1994) Introduction to special section on volcanic and hydrothermal processes on the southern Juan de Fuca Ridge. J. Geophys. Res. *99*, 4735-4740.

Gould SJ (1992) Die Entdeckung der Tiefenzeit. Dtv, München.

Karl DM, Wirsen CO & Jannasch HW (1980) Deep-sea primary production at the Galapagos hydrothermal vents. Science *207*, 1345-1347.

Kennett J (1982) Marine Geology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Kerr RA (1983) Ophiolites: windows on which ocean crust? Science *219*, 1307-1309.

Lowell RP, Rona PA & Von Herzen RP (1995) Seafloor hydrothermal systems. J. Geophys. Res. *100*, 327-352.

Macdonald KC & Luyendyk BP (1981) Tauchexpedition zur Ostpazifischen Schwelle. Spektrum der Wissenschaft, Juli, S. 72-87.

Nicolas A (1989) Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Kluwer, Dordrecht.

Nicolas A (1995) Die Ozeanischen Rücken. Gebirge unter dem Meer. Springer, Berlin – Heidelberg.

Pettersson H (1954) The ocean floor. Yale University Press, New Haven.

Rona PA (1986) Erzbildung an heißen Quellen im Meer. Spektrum der Wissenschaft, März, S. 78-87.

Rona PA & Thompson G (1993) Introduction to Atlantic hydrothermal activity. J. Geophys. Res. *98*, 9621-9623.

Seibold E (1974) Der Meeresboden. Springer-Verlag, Heidelberg.

Spiess FN et al. (RISE Project Group; 1980) East Pacific Rise: hot springs and geophysical experiments. Science *207*, 1421-1433.

Sullivan W (1980) Warum die Erde bebt. Fischer, Frankfurt.

Von Damm KL (1990) Seafloor hydrothermal activity: black smoker chemistry and chimneys. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. *18*, 173-204.

Wolery TJ & Sleep NH (1976) Hydrothermal circulation and geochemical flux at mid-ocean ridges. J. Geology *84*, 249-275.

Lucys Großeltern – die ersten Urmenschen?

Sigrid Hartwig-Scherer, Frühlingstr. 67a, 85354 Freising

Zusammenfassung: **Das Forscherteam um Tim WHITE aus Berkeley und seine Mitarbeiter aus Addis Abeba und Tokio, die seit 1992 in Äthiopien Grabungen durchführen, barg und beschrieb Überreste von etwa 17 Hominiden, die vor allem Zähne und Zahnbruchstücke und drei Armknochenfragmente umfassen (WHITE et al. 1994). Weitere, noch nicht beschriebene Funde folgten 1994. Die Funde werden auf 4,4 Millionen Jahre geschätzt, wobei wegen einer Verunreinigung des zu datierenden Horizontes ein Umweg in der Datierung beschritten werden mußte. Während die Fossilien in der Originalarbeit als neue Art – *Australopithecus ramidus* sp. nov. – beschrieben wurde, haben inzwischen die gleichen Autoren die Funde aus *Australopithecus* ausgegliedert und eine neue Gattung – *Ardipithecus* – eingeführt (WHITE et al. 1995). *A. ramidus* stellt nach ihren Beschreibern eine Schwestergruppe der Hominiden dar, d.h aller Australopithecinen und Menschen. Eine Reihe ursprünglicher Merkmale wird dieser neuen Form zugeordnet, die sie wesentlich schimpansenähnlicher macht als die mindestens 500.000 Jahre jünger datierte Form *A. afarensis*. Indirekt weisen Fragmente der Schädelbasis auf eine eher zentrale Position des Hinterhauptslochs hin, ein Merkmal, das mit dem aufrechten Gang in Verbindung gebracht wird. Da jedoch bislang nur Vordergliedmaßen beschrieben wurden, läßt sich – entgegen Meldungen in der Tagespresse – über die Fortbewegung kaum etwas aussagen. Brandneue Funde der letzten Grabungssaison von 1994 umfassen zwar Fragmente der Hintergliedmaßen, sind bis jetzt aber noch nicht analysiert worden.**

Diejenigen, die ein fossiles Verbindungsglied zwischen einem schimpansenähnlichen Vorfahren der *Pan-Homo*-Linie (Schimpanse – Mensch) und dem frühesten Vertreter der Hominidenlinie, etwa *A. afarensis*, suchen, betrachten diesen Fund mit einer gewissen Befriedigung. Die Form ist weder Hominide noch hundertprozentiger Menschenaffe – und stellt für viele das „missing link" dar. Für andere ist dieser Fund gleichermaßen verträglich mit der Vorstellung, daß *Ardipithecus ramidus* neben *Australopithecus* und *Paranthropus* zu einer Radiationsreihe plio-pleistozäner Menschenaffenformen gehörte, vorläufig als „Australomorphe" bezeichnet. Entsprechende, noch wesentlich lebhaftere Radiationen sind von den Menschenaffen des Miozäns bekannt. Es wäre deshalb nicht unerwartet, wenn ähnliche Radiationen auch im Plio-Pleistozän beobachtet würden.

An der Wurzel der Australopithecinen

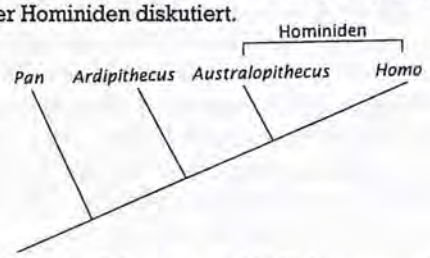
Die Hominidengruppe *Australopithecus*, die im Pliopleistozän gelebt hat, ist ausschließlich aus Afrika bekannt: Der erste Vertreter und Namensgeber dieser Gattung – das Taung-„Baby" – wurde in den zwanziger Jahren von Raymond DART in Südafrika gefunden. DART erkannte, daß es sich bei dem Fund weder um *Homo* noch um einen heute lebenden Menschenaffen handelte, sondern um eine neue Gattung. Bis allerdings der hominide Status anerkannt wurde, vergingen über zwei Jahrzehnte. Weitere Vertreter dieser Art *Australopithecus africanus* wurden ebenfalls in Südafrika gefunden. Inzwischen sind eine Reihe weiterer Arten benannt worden, und in den letzten beiden Dekaden häuften sich Funde dieser Gattung vor allem in Ostafrika. Ausgrabungskampagnen erbrachten auch in jüngster Zeit aufregende Funde, sodaß Afrika weiter im Zentrum des paläanthropologischen Interesses verbleibt, zumindest was die frühe Evolution des Menschen betrifft (Abb. 1): Im März 1994 wurde über den Fund eines relativ kompletten robusten *A. afarensis*-Schädels und anderer Skelettfragmente aus Hadar, Äthiopien, berichtet (KIMBEL et al. 1994) (siehe HARTWIG-SCHERER 1994).

Wenige Monate später, im September, erschien die Beschreibung von ca. 50 Skelettfragmenten, die zu ungefähr 17 verschiedenen Individuen gehört haben mögen und die zwischen 1992 und 1993 in Aramis, Äthiopien, von der Gruppe um Tim WHITE gefunden wurden (Abb. 1). 1994 folgten weitere 90 Skelettreste, u.a. ein partielles Skelett eines erwachsenen Individuums mit Unterkiefer und Fragmente der Hintergliedmaßen, die aber noch nicht beschrieben wurden. Gleichzeitig mit der Fundbeschreibung führten die Autoren die neue Art *Australopithecus ramidus* ein. „Ramid" bedeutet in der Afarsprache „Wurzel" und unterstreicht die phylogenetische Bedeutung, die dieser neuen Art beigemessen wird, nämlich Ausgangsart des menschlichen Stammbaums zu sein.

Die Fundstelle liegt ungefähr 60 km südlich von Hadar, wo vor über 20 Jahren Fossilien des bis dato ältesten, angeblichen Vorfahren des Menschen geborgen wurden: *A. afarensis* mit dem prominentesten weiblichen Vertreter „Lucy" (JOHANSON & TAIEB 1976). Auch in unmittelbarer Nähe von Aramis (Abb. 1) hat man in Belohdelie und in Maka hominide Fossilreste gefunden (WHITE 1984; WHITE et al. 1993), die zwischen 3,5 und 3,8 Millionen Jahre datiert und alle mehr oder weniger klar der Art *A. afarensis* zugeordnet wurden.

Glossar

Schwestergruppe: Gruppe, die mit einer weiteren Gruppe von einem zuvor gemeinsamen Vorfahren abgeleitet wird. Die Australopithecinen und *Homo* sind nach der Evolutionsvorstellung Schwestergruppen; *Ardipithecus* wiederum wird als Schwestergruppe der Hominiden diskutiert.



Hominiden: Sehr unterschiedlich verwendeter Begriff. Je nach Autor werden alle Formen der Gattungen *Homo* und *Australopithecus* und andere unmittelbare evolutionstheoretisch postulierte Vorfahren des Menschen unter diesem Begriff zusammengefaßt. Vermehrt wird auch der Schimpanse *(Pan)* dazugestellt. Ursprünglich waren „vergrößertes Gehirn" und „aufrechter Gang" die gemeinsamen Merkmale der Gruppe.

Plio-Pleistozän: Zeitraum, der den Übergang zwischen den beiden geologischen Epochen Pliozän und Pleistozän (ca. zwischen 2 und 4 Millionen Jahre nach radiometrischen Datierungen) markiert. In der Schichtenfolge darunter folgt das Miozän.

Datierung

Die Aramis-Fossilien sollen 4,4 Millionen Jahre alt sein (WoldeGabriel et al. 1994). Damit wäre die neue Art *A. ramidus* ca. 800.000 Jahre älter als „Lucy" und 500.000 Jahre älter als die ältesten Vertreter dieser immer noch umstrittenen, sexual stark dimorphen Art *A. afarensis*. Die Fossilien, die Oberflächenfunde sind, kommen allem Anschein nach aus einer Schicht, die unter einem auf 3,9 Millionen Jahre datierten Horizont liegt. Unter dieser datierbaren Schicht liegen zwei weitere Tuffschichten, zwischen denen die Oberflächenfunde wahrscheinlich vor ihrer Auswaschung eingebettet gewesen waren. Allerdings ist die Datierung beider Ascheschichten sehr problematisch, da sie mit miozänem Gestein, das auf 23 Millionen Jahren datiert wird, so kontaminiert waren, daß keine verläßlichen Daten erhoben werden konnten. Eine Datierung der darunterliegenden Tuffschicht ergab einen einigermaßen passenden Wert um 4,4 Millionen Jahre (siehe auch Abb. 1). Dieser eine Wert wurde mittels einer weiteren Datierungsmethode bestätigt: Mit Hilfe der magnetostratigraphischen Zeitskala ergab sich für den fossilführenden Horizont, daß er der Umkehrungsschicht des Erdmagnetfeldes zwischen den Ninivak- und Cochiti-Subchronen entspricht. Aus beiden Daten leitet man für die Funde ein Alter zwischen 4,3 und 4,5 Millionen Jahren ab.

Ein Waldbewohner

Faunen-, Floren- und sedimentologische Analysen ergaben, daß der Lebensraum der neuen Art relativ dicht bewaldet gewesen sein muß (WoldeGabriel et al. 1994). Der erstaunlich hohe Anteil von Schlankaffen (Colobiden) mit über 30% aller dort gefundenen Wirbeltiere steht im krassen Gegensatz zu den bisher bekannten plio-pleistozänen Fundstellen, an denen Hominiden eher mit Savannentieren gefunden wurden. Deshalb gehen die Forscher davon aus, daß *A. ramidus* offene Lebensräume stärker vermied als die eher tolerantere Nachfolgeart *A. afarensis*. Dieser Befund ist für die gängige Vorstellung unerwartet. Doch wurde schon früher ein ähnliches Szenario vorgeschlagen, das soweit ging, daß von einigen Autoren ein Leben auf den Bäumen bis vor 2 Millionen Jahre angenommen wurde (Susman et al. 1984). Zeitgleich haben andere zweibeinig aufrechtgehende Hominiden gelebt.

Wenn in dieser Zeitspanne um 4-5 Millionen Jahre hominide Formen eher in Waldgebieten lebten, würde sich eine Erklärung für die große Fundlücke zwischen 10 und 5 Millionen Jahre anbieten: die Spärlichkeit der Funde könnte darauf zurückzuführen sein, daß man bisher kaum fossilführende Schichten waldreicher Gebiete kennt bzw. untersucht hat.

Zusätzlich zur Faunen- und Florenanalyse ergab die Zahnanalyse, daß Früchte, Blätter und Insekten Hauptnahrungsquellen waren. Der Zahnschmelz, der wesentlich dünner ist als bei den Australopithecinen, stellt den neuen Fundkomplex auch in der Art der Ernährung (Blätter und Früchte) zu den Afrikanischen Menschenaffen.

Der Hinweis auf den Wald als Lebensraum führte in der Tagespresse zu der Überzeugung, daß sich *A. ramidus* während des Tages aufrecht gehend fortbewegte, aber zum Übernachten auf Bäume geklettert ist. Allerdings können bis jetzt nur ganz indirekte Angaben zum aufrechten Gang gemacht werden: Einige Merkmale an den Schädelknochen deuten auf ein gegenüber den Affen leicht vorverlagertes Hinterhauptsloch hin (was auch ab und zu als ein Hinweis auf ein leicht vergrößertes Gehirn gewertet wird). Die Behauptung, daß *A. ramidus* eine Art aufrechten Gang beherrschte, wird an den Knochenfragmenten der Hintergliedmaßen getestet werden müssen. Eine Kurzmeldung in der FAZ vom 8. 2. 1995 informierte über die Bergung weiterer 90 Skelettelemente inklusive Hintergliedmaßen (Fragmente einer Tibia und eines Femur), welche zu einem erwachsenen Individuum gehört haben. Auf der größten Anthropologen-Tagung in den USA Ende April 1995, wo die Autorin die ausführliche morphologische Vorstellung der Aramisfossilien miterlebte, wurde die Existenz eines solchen partiellen Skelettes nur ganz am Rande erwähnt, eine eher ungewöhnliche Zurückhaltung bei hominiden Funden. Aus den Knochenresten eines erwachse-

nen *A. ramidus* sollen sich angeblich 45% eines Gesamtskeletts rekonstruieren lassen. Der Erhaltungszustand dieser neuesten sensationellen Funde scheint jedoch recht kritisch zu sein, so daß man sich gedulden muß, bis umfangreiche und zeitaufwendige Forschungen ergeben, ob diese Art tatsächlich eine Form des aufrechten Gehens beherrschte oder nicht. Außerdem stehen noch Vergleiche mit einem ähnlich alten Femur aus Kenia (Middle Awash, datiert um 4 Millionen Jahre) und einem auf ungefähr 4,5 Millionen Jahre datierten Humerus, der 1965 in Kanapoi gefunden wurde (GEE 1995) aus. (Allerdings wird letzterer auch zu *Homo* gehörig klassifiziert, so daß der Vergleich weniger relevant wäre [BRANDT 1995].) Wie sich Nachfolgearten der Gruppe der Australopithecinen fortbewegten, wird mit allen damit verbundenen Interpretationsproblemen und gängigen Vorstellungen über die Evolution des aufrechten Ganges in BRANDT (1995) diskutiert.

WHITE und Mitarbeiter schlossen aus den drei Armknochen (ARA-VP 7/2, siehe Box), insbesondere aus dem größeren Gelenkkopf des Oberarms, daß dieses Individuum schwerer als „Lucy" gewesen sei. Die kräftigen Armknochen könnten gleichzeitig auch darauf hinweisen, daß diese Form an das Klettern angepaßt war. Die Kombination eines relativ kurzen, aber robusten Oberarmknochens mit einer langen Elle und der gebeugte Schaft der Unterarmknochen deuten ebenfalls auf eine Fortbewegung ähnlich der eines Schimpansen hin (KIMBEL et al. 1994). Die dem Baumleben angepaßte schimpansenähnliche Fortbewegungsweise wird auch bei den stratigraphisch jüngeren *afarensis*-Fossilien vermutet. Dies mag mir eine Prognose gestatten bezüglich des Humerofemoralindexes (HFI): dieses Längenverhältnis von Oberarm (Humerus) und Oberschenkel (Femur), das z.T. die Fortbewegungsweise widerspiegelt, wird sich nicht sehr stark von dem des Schimpansen (HFI 102%), wohl aber von dem des Menschen (HFI 70%; AIELLO & DEAN 1990) unterscheiden. Bei AL 288-1 („Lucy") kann der Humerofemoralindex als „intermediär" (HFI 85%; JOHANSON & WHITE 1979) und bei dem geologisch wesentlich jüngeren *„Homo habilis"* OH 62 als recht affenähnlich (HFI ca 95%; JOHANSON et al. 1987) bezeichnet werden.

Diagnostische Probleme

Die Abgrenzung dieser neuen Form von anderen Australopithecus-Arten gestaltete sich einfacher als die Unterscheidung von lebenden und ausgestorbenen Menschenaffen, wie z.B. *Pan* (Schimpanse) und den fossilen Formen wie *Sivapithecus, Kenyapithecus, Ouranopithecus, Lufengpithecus* und *Dryopithecus*. Ein Grund für diese Schwierigkeit liegt in fehlenden abgeleiteten Merkmalen, mit denen die taxonomische Zuordnung zu den Hominiden oder den Menschenaffen vorgenommen werden könnte: die meisten Merkmale sind so unspezifisch, daß eine Zuordnung schwierig oder unmöglich ist. Es gibt sowieso nicht allzuviele diskrete und autapomorphe (gruppeneigene) Merkmale, welche die Hominiden von den Menschenaffen abgrenzen, wobei als ein wesentlicher diagnostischer Merkmalskomplex der aufrechte Gang mit allen seinen morphologischen Korrelaten zählt (*per definitionem* gehören alle zweibeinig aufrechten Formen zu den Hominiden).

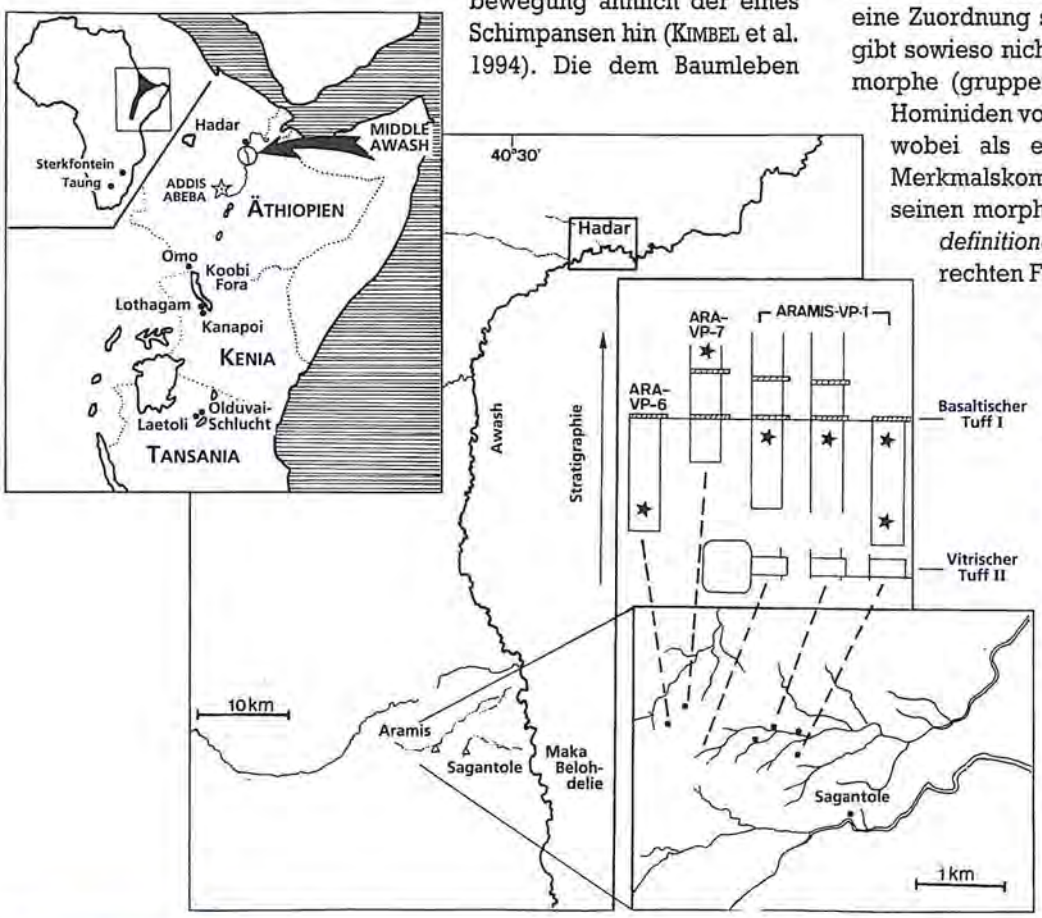


Abb. 1: Wichtige plio-pleistozäne Fundstellen Afrikas, insbesondere Ostafrikas und des Middle Awash, Äthiopien. Nördlich des Middle Awash, in Hadar, wurde A. afarensis *geborgen, ähnlich frühe plio-pleistozäne Formen sind aus Maka und Belohdelie im Middle Awash bekannt. Der neue, etwas ältere Fundkomplex* A. ramidus *wurde wenige Kilometer westlich davon entlang des Aramistals gefunden. Rekonstruktion der Schichtenfolge mit Hilfe der wahrscheinlichen Herkunft der Oberflächenfunde. Die Sterne bezeichnen die vermutliche stratigraphische Stellung der Oberflächenfunde der Hominidenfossilien. Die Nummern über den Balken sind Fundnummern. Nach WHITE (1984) und WOLDEGABRIEL et al. (1994).*

Da das Merkmal „aufrechter Gang" bei *A. ramidus* bis jetzt nur indirekt aufgrund des im Vergleich zum Schimpansen etwas zentraler liegenden Foramen magnum (Hinterhauptsloch) zumindest als teilweise ausgeübte Verhaltensform vermutet werden mag, aber nicht eindeutig bestimmt werden kann, fehlt ein entscheidendes diagnostisches Merkmal (das neue Teilskelett harrt noch der Analyse). Der erste untere Milchmolar, ein weiteres wichtiges Schlüsselmerkmal, um nichterwachsene Hominiden von Menschenaffen zu unterscheiden, spricht nicht für den hominiden Status, da er morphologisch dem Schimpansen wesentlich ähnlicher ist als irgendeinem bekannten Hominiden. Für die Diagnose verbleiben somit nur mehr oder weniger graduelle, d.h. schwer faßbare, Merkmale (siehe Box).

Am Skelett finden sich affenähnliche Merkmale wie der große Styloidfortsatz an der Speiche oder das Ellenbogengelenk des Oberarm, was die Robustizität und Form betrifft. Auch diverse Schädelknochen sind außerordentlich schimpansenähnlich, besonders das Schläfenbein. Allerdings fehlen wiederum auch wichtige Merkmale, die man gewöhnlich bei Menschenaffen antrifft, wie die tiefe, tunnelartige Bizepsgrube am Oberarm. Hominidenartig ist der elliptische Oberarmkopf, das distale Schaftende der Elle und die nach vorn weisende Ansatzstelle für den Brachialismuskel.

Neue Art oder neue Gattung?

White und Mitarbeiter hatten sich in ihrer Publikation von 1994 genügend Spielraum für eine eventuelle taxonomische Revision eingeräumt, indem sie ihre Originalveröffentlichung mit den Worten schließen: „The anticipated recovery at Aramis of additional postcranial remains, particularly those of the lower limb and hip may result in reassessment of these fossils at the genus and family level." Tatsächlich veröffentlichten dieselben Autoren einige Monate nach der Neubeschreibung von *Australopithecus ramidus* in Form eines Korrigendums zum Originalartikel (White et al. 1995) die Ausgliederung der Aramis-Funde aus der Gattung *Australopithecus* und führten eine neue Gattungsbezeichnung – *Ardipithecus* – ein. Wahrscheinlich war die Abtrennung auf Gattungsebene vorher vermutet und inzwischen notwendig geworden, um der Kritik anderer Anthropologen zuvorzukommen. Die Problematik, den hominiden Status dieser neuen Art nur sehr schwer stützen zu können, wurde schon von Gee als auch von Wood angemahnt, die im letzten September die Funde in *Nature* kommentierten (Gee 1995; Wood 1994). Auch wenn im Korrigendum bis jetzt nur vom Schwestertaxon der Hominiden die Rede ist, läßt das oben erwähnte Zitat auch eine neue Familienbezeichnung erwarten. Dieser weitreichenden Umgruppierung liegt vor allem das Fehlen hominider Diagnosemerkmale zugrunde.

Es könnten sich für *A. ramidus* noch anderweitige nomenklatorische Komplikationen ergeben: 1989 wurde für das um einiges ältere Tabarin-Kieferfragment aus Baringo, das in Hill (1985) beschrieben ist, der Subspeciesname *prägens* vorgeschlagen (Ferguson 1989). Dieses Fossil, das dem Teil der Hadar-Fossilgruppe zuzurechnen ist, hatte Ferguson zuvor *Homo antiquus* genannt. Sollte sich herausstellen, daß dieser Unterkiefer zur gleichen Art wie die Fossilien aus Aramis gehört, würde diesem Unterartnamen gemäß der anerkannten Richtlinien

Beschreibung von A. *ramidus*

(White et al. 1994) und Korrigendum (White et al. 1995)

Taxonomie:
Primates Linnaeus 1758; Anthropoidea Mivart 1864; Hominoidea Gray 1825; *Ardipithecus* gen. nov.; *A. ramidus* sp. nov.

Holo- und Paratypen:
Der Holotyp ARA-VP-6/1 besteht aus einem Satz assoziierter Zähne, die zu einem einzigen Individuum gehören, darunter obere und untere I1, C, P3, P4. Diesem namengebenden Fossilkomplex wurden weitere Funde als sogenannte Paratypen beigeordnet, die ebenfalls 1993, aber auch schon 1992 geborgen wurden: Elemente der oberen Extremität (ARA-VP 7/2; linker Humerus, Radius und Ulna), die zu einem Individuum gehören, einige Schädelfragmente (Os temporale ARA-VP 1/125; Temporal- und Occiputfragment ARA-VP 1/500), eine rechte Unterkieferhälfte (ARA-VP 1/129) von einem Kind mit Milchmolar und zentralem Schneidezahn und verschiedene einzelne und assoziierte Zähne.

Fundumstände:
Die Fossilien wurden 1992 und 1993 im Middle Awash-Gebiet, Äthiopien, westlich des Awash-Flusses bei dem Dorf Aramis, 75 km südlich von Hadar geborgen (Abb. 1). Es werden 3 verschiedene Fundstellen ARA-VP-1, ARA-VP-6 und ARA-VP-7 unterschieden. Bei allen Funden handelt es sich um Oberflächenfunde, die unmittelbar auf dem Gáala Vitric Tuff lagen, der auf 4,39 Millionen Jahre datiert wurde. Der Holotyp, d.h. der namengebende Fund, wurde am 29. 12. 1993 von einem äthiopischen Mitarbeiter gefunden.

Diagnostische Merkmale:
Abgrenzung von anderen *Australopithecusarten:*
Eckzähne sind relativ größer im Vergleich zu der postcaninen Bezahnung; der erste Milchmolar des Unterkieferfragmentes ARA-VP 1/129, der schmal und verlängert und eher affen- als hominidenähnlich ist; die Zahnschmelzdicke der Eckzähne und vor allem der Dauermolaren ist viel dünner als für Hominden erwartet und intermediär zwischen den Menschenaffen und der *afarensis-Homo*-Linie; die C/P3-Morphologie ist wesentlich affenähnlicher als bei *A. afarensis*, insbesondere der erste Prämolar (P3; Holotyp ARA-VP-6/1). Weitere Merkmale: sehr flache Kiefergelenkgrube ohne prominenten Gelenkhöcker (Eminentia articularis). Stark pneumatisiertes Temporale. Unterer und oberer P3 viel asymmetrischer. Großer Processus styloideus am distalen Radius. Kräftige Trochlearkante am distalen Humerus mit nach hinten verlängertem lateralem Epicondylus.

Abgrenzung als hominid gegenüber rezenten und fossilen Menschenaffen (Sivapithecus, Kenyapithecus, Ouranopithecus, Lufengpithecus und Dryopithecus):
Die Kronen der Eckzähne sind weniger hoch und dolchförmig, mit relativ hohen Kronenschultern und etwas mehr schneidezahnförmig. Der untere Prämolar P3 besitzt eine weniger ausgeprägte mesiodistale Ausbuchtung der Kronenbasis, d.h. kein typisch sektoriales Gebiß, d.h. P3 ohne Schleiffacette, leicht molarisiertes postcanines Gebiß, ein etwas vor dem Foramen caroticum positioniertes Foramen magnum (Hinterhauptsloch) und zwei weitere Merkmale an der Schädelbasis, die auf ein leicht nach vorn verlagertes Hinterhauptsloch hindeuten (indirekter Hinweis auf potentielles bipedes Gehen).

als Artname der Vorrang zu geben sein. WHITE und Mitarbeiter widmeten dieser Fragestellung entsprechenden Raum in der Diskussion und versuchten nachzuweisen, daß dieses Fossil nicht genügend von *A. afarensis* abzugrenzen ist und daß es sich nicht eindeutig mit *A. ramidus* in Verbindung bringen läßt. Sie halten außerdem „praegens" für ein nomen dubium und beantragen, diese Artbezeichnung zu unterdrücken, auch dann, wenn es sich herausstellen sollte, daß der Tabarin-Unterkiefer zu den Aramisfossilien zu stellen ist.

Wenn nun die Vorschläge WHITES und Mitarbeiter von der Nomenklaturkommission akzeptiert werden, heißt die neue Art also *Ardipithecus ramidus* gen nov., spec. nov. „Ardi" heißt „Boden" und die Beschreibung läßt Raum für die Spekulation, daß sich dieses wohl ans Baumleben angepaßte menschenaffenähnliche Geschöpf in dem stark bewaldeten Gebiet auch ab und zu auf den Boden herunterwagte, um gelegentlich einen aufrechten Gang ähnlich *A. afarensis* zu praktizieren.

Phylogenetische Stellung

In der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts schossen im Rahmen der menschlichen Evolutionsforschung neue Gattungsnamen nur so aus dem Boden: *Eoanthropus* WOODWARD 1912, *Australopithecus* DART 1925, *Sinanthropus* BLACK 1927, *Paranthropus* BROOM 1938, *Plesianthropus* BROOM 1947, *Zinjanthropus* LEAKEY 1959 und andere. Diese verschiedenen Gattungsnamen wurden zu Beginn der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts auf gerade zwei reduziert – *Homo* und *Australopithecus,* da die Paläanthropologie aufgrund eines gegenläufigen Trends gegenüber der Einführung neuer Gattungen und Arten außerordentlich reserviert war. Nach dieser Periode des „lumpings" (Vereinigung verschiedener Formen in eine taxonomische Einheit) scheint sich inzwischen die Tendenz wieder in Richtung „splitting" (Aufspaltung vorhandener taxonomischer Einheiten in neue Gattungen und Arten) umzukehren: so wurde nicht nur *Paranthropus* wiederbelebt (WOOD 1991; 1992) und die neue Gattung *Ardipithecus* eingeführt, sondern auch eine Reihe neuer Artnamen kreiert (siehe Abb. 2 nach WOOD 1994). Mit *Ardipithecus* erhält die Linie, die nach Ansicht der Evolutionsbiologen zum Menschen führte und je nach Auffassung zwei bzw. drei Gattungen (*Homo* und *Australopithecus/Paranthropus*) umfaßt, nun auch eine neue Schwestergruppe.

Die Artbezeichnung „ramidus" (Wurzel) suggeriert schon die Stellung, die die Autoren für ihre Funde vorschlagen. In der Presse haben sie einen entsprechend breiten Resonanzboden gefunden: Dort werden Vertreter des *A. ramidus* als Missing Link zwischen Mensch und Affe, als ältester Urahn des Menschen, als erster Urmensch oder – von dem Entdecker der Lucy in seinem Newsletter – als Lucy's Großeltern angesprochen (JOHANSON 1995).

Tatsache ist, daß mit diesem Fund eine große Fundlücke zwischen 4 und 8 Millionen Jahren zumindest um eine halbe Million Jahre verkleinert wurde. In dieser Zeitepoche hat man – bisher vergeblich – den Ursprung der Hominiden nachzuweisen versucht (HILL & WARD 1988). Diese Fundlücke war und ist für die Paläoanthropologen umso schmerzvoller, als in dieser Zeitspanne die wesentlichen morphologischen Umkonstruktionen für die Evolution des aufrechten Gang postuliert werden müssen. Unter der Annahme, daß eine solche evolutive Umgestaltung stattgefunden habe, müßte dies ein außerordentlich komplexer, fast alle Organe betreffender Vorgang gewesen sein. Da man diese überaus wichtigen Evolutionsschritte in dieser Zeit ansetzen muß, empfand man in der anthropologischen Welt eine gewisse Befriedigung, eine zeitliche, aber vor allem eine morphologische Lücke zwischen Affen und Hominiden zu füllen, besonders weil das Fossil in einigen Punkten den Erwartungen entsprach: primitivere Zahnmerkmale, schimpansenähnliche Gesichts- und Schädelmorphologie. Allerdings gibt es noch weit ältere Fossilien, wenn auch nur eine halbe Hand voll: die Lothagam-Mandibel, auf 5,6 Millionen Jahre datiert (HILL et al. 1992), der fragmentarische Tabarinunterkiefer und das obere Ende eines Oberarms von Baringo um 5 Millionen Jahre (HILL 1985), das 4 Millionen Jahre alte Unterkieferfragment von Allia Bay am Turkanasee, Kenia (COFFING et al. 1994), die ähnlich alten Fejej-Zähne (FJ-4-SB 1a-d), die nordöstlich vom Turkanasee gefunden wurden (FLEAGLE et al. 1991), die jüngere, 3,9 Millionen Jahre alte, fast vollständige Speiche KNM-ER 20419, die ebenfalls von Allia Bay ist und recht affenähnlich erscheint (HEINRICH et al. 1993). Ein auf 6 Millionen Jahre geschätzter erster Molar aus Lukeino KNM-LU 335 war wegen seiner Morphologie als typisch für einen Vorfahrentypus von *Homo* vorgeschlagen worden (UNGAR et al. 1994). Alle diese Funde waren vorläufig in die Nähe von *Australopithecus afarensis* gestellt worden und es muß sich nun herausstellen, ob sie zur neuen Art *Ardipithecus ramidus* zu zählen sind.

Kontroversen um die plio-pleistozänen Formen

Möglicherweise jedoch stellen die Aramis-Funde überhaupt keine gute Übergangsgruppe dar. Es ist interessant zu verfolgen, wie sich ein Kommentator aus *Nature* (GEE 1995) das Szenario um die zukünftige Diskussion vorstellt. Er lehnt seine Prognose an die Erfahrung an, die die wissenschaftliche Welt mit *A. afarensis* gemacht hatte. Zuerst werde nach GEE diskutiert werden, ob es sich wirklich um eine einzige Art mit stark ausgeprägtem Sexualdimorphismus handele. Gleichzeitig werde die Frage auftauchen, ob es sich überhaupt um einen Hominiden

handelt und ob man diese Art nicht besser aus der Gattung *Australopithecus* ausgliedern solle. (Diese Prognose hatte sich tatsächlich in kürzester Zeit erfüllt, als vier Monate später WHITE und Mitarbeiter (1995) *Ardipithecus* als Schwestertaxon zu den Hominiden vorschlagen, eine Art Flucht nach vorne im Wissenschaftsbetrieb.) Gleichzeitig werde man sich die Fragen stellen, ob diese Gruppe die Ahnen von Australopithecinen/Mensch und dem Schimpansen, möglicherweise aber nicht vom Gorilla umfaßt. Geht man bei *A. ramidus* von einer aufrecht gehenden Form aus, wird der aufrechte Gang zu einem primitiven Merkmal, das *Pan* verloren, die Menschen jedoch beibehalten haben. Hat diese Form keine Anzeichen von zweibeinig aufrechtem Gehen, wird sie aber als Vorform von *A. afarensis* angesehen, muß man den Übergang zum bipeden Gehen innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes annehmen (*A. afarensis* zeigt eine sehr spezielle Anpassung an eine Form des aufrechten Gangs, der sich von der des Menschen fundamental unterscheidet; siehe dazu auch BRANDT 1995). Wenn *A. afarensis* zwei oder drei Arten umfaßt, wie einige Forscher meinen, entsteht die Frage, welche der Arten – *A. africanus*, *A. robustus*, *Homo* – den Aramisfossilien am nächsten stehen.

Selbst einige Vertreter der „habilis"-Gruppe (z.B. OH 62) weisen erstaunlich primitive Merkmale auf: Sie sind entweder australopithecinenähnlich, z.B. die Hypermolarisation (extreme Vergrößerung der Backenzähne) oder schimpansenähnlich – wie z.B. die Langknochenproportionen (HARTWIG-SCHERER & MARTIN 1991) und die affenähnliche Innenohrmorphologie (SPOOR et al. 1994). Die beiden letzteren Merkmale sind klare Indizien gegen ein gewohnheitsmäßiges zweibeinig aufrechtes Gehen. Diese schon länger bekannten Probleme mit dem Erscheinen des aufrechten Ganges ließen sich u.a. dadurch lösen, daß man *Ardipithecus*, *Australopithecus* und einige „habilis"-Formen als Radiationsformen innerhalb der Gruppe der Australopithecinen ansieht: Sie waren alle gekennzeichnet durch eine spezielle Bewegungsanpassung, dem sogenannten Stemmgreifklettern, die morphologisch der Anpassung ans aufrechte Gehen ähnlich ist.

Um der phylogenetischen Festlegung etwas aus dem Weg zu gehen, schlägt GEE als Interpretationsmöglichkeit eine eher konservative Einordnung des *A. ramidus* vor, indem man ihn auch als „the first known representative of a hitherto undiscovered radiation of pre-hominid creatures" ansprechen könne (GEE 1995). Umfangreiche Radiationen sind auch aus dem Miozän bekannt, als innerhalb kurzer Zeit eine große Zahl weitverbreiteter Arten hervorgebracht wurden (ANDREWS 1981; 1992). Auch die Australopithecinen des Plio-pleistozäns könnten in ähnlicher Weise unterschiedliche morphologische Richtungen erobert haben: die grazilen Formen von *A. afarensis* über A. *africanus* bis hin zu einigen

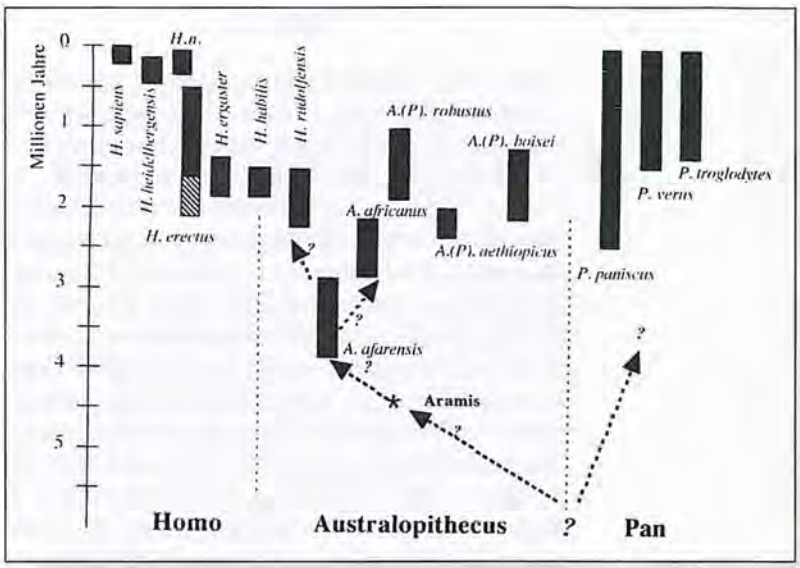


Abb. 2: Ein vorgeschlagener vorläufiger Stammbaum umgezeichnet nach WOOD *et al. (1994), der die neuen Funde von Aramis (*A. ramidus*) als „Wurzelform" der Australopithecinen ansieht. Die schwarzen Balken stellen das stratigraphische Vorkommen der einzelnen Arten, die gestrichelten Linien die hypothetischen evolutiven Verbindungslinien dar. Von der Morphologie und der stratigraphischen Stellung her entspricht der recht affenähnliche Fund besser als alle bisherigen Funde der Vorstellung eines Bindegliedes zwischen einem Vorfahren der Australopithecinen und dem des Schimpansen (im Volksmund zwischen Mensch und Affe). Wie die Australopithecinen über die recht heterogene „habilis"-Gruppe zum Menschen führen, bleibt durch die Funde unberührt. Gleichzeitig ergänzen die neuen Funde die Vielgestaltigkeit der frühen Hominiden, die einen Stammbusch anstelle eines Stammbaumes nahelegen. Es ließe sich gleichermaßen argumentieren, daß diese Form Zeugnis von einer ausgeprägten Radiation plio-pleistozäner hominider Arten gibt, ohne sie in die Vorfahrenschaft zum Menschen stellen zu müssen.*
Die plio-pleistozäne Radiation umfaßt – je nach Taxonomie – vier bis sechs Arten. Manche gliedern die robusten Formen auf Gattungsebene aus der Gattung Australopithecus *aus, so daß A.(P.) hier* Australopithecus *bzw.* Paranthropus *bedeutet. Auch bei späteren Formen fallen neue Artnamen auf: Nach* WOOD *(1992) umfaßt die Gruppe des frühen* Homo *die Arten* H. rudolfensis *mit KNM-ER 1470,* H. habilis *mit den namengebenden Olduvai-Formen, inklusive dem recht affenähnlichen OH 62, und* Homo ergaster *(z.B. KNM ER- 3733 und 3883) als afrikanische Vorläuferart des sich in Asien ausdifferenzierten* Homo erectus. *Vertreter der beiden ersten Arten wurden von verschiedenen Autoren auch den Australopithecinen zugeordnet. Deshalb mögen sich diese Formen einer einzigen Radiation der „Australomorphen" (Definition siehe Text) zuordnen lassen.*

„Homo" habilis-Vertretern, wie OH 62 und die Vertreter von *H. rudolfensis* und die robusten Formen mit der Sequenz *A. afarensis – A. aethiopicus – A. robustus – A. boisei* (siehe Abb. 2). Nach dem Vorbild der Ramamorphen könnte man für diese pliopleistozäne Radiation den Begriff der „Australomorphen" einführen, ein Terminus, der keinen Anspruch auf einen taxonomischen Rang erhebt. Diese Radiationsgruppe wird nach der Evolutionsvorstellung als die Übergangsgruppe zwischen miozänen Menschenaffen und den Australopithecinen und damit auch als Übergangsform auf dem evolutiven Weg zum Mensch angesehen (Abb. 2). Gleichermaßen läßt sie sich auch als eine Radiationsgruppe verstehen, die *neben* anderen Radiationsgruppen, z.B. *Homo*, gelebt haben (Grundtypvorstellung).

Ausblick

Geht man von der Evolutionssequenz Miozäne Affen – Australopithecinen – Mensch aus, so entspricht der neue Fundkomplex *A. ramidus* für eine Reihe von Merkmalen einer Reihe von Erwartungen, die man an eine solch „intermediäre" Form hat. Zwei wesentliche Fragenkomplexe bleiben jedoch von diesem Neufund unberührt: (1) welche der Australopithecinen brachte letztlich *Homo* hervor? (2) Welche der miozänen Menschenaffenformen leitete zu den Australopithecinen über? Es gibt keinen Konsens darüber, ob sich die bisher bekannten miozänen Formen eher als Vorfahren der Hominiden- und Schimpansenlinie (Begun 1992) oder eher als Vorfahren des Orang-Utans eignen (Moyà Solà & Köhler 1993). „...mit jeder Entdeckung, die einen neuen Kandidaten hervorbringt, wird die Diskussion eher schwieriger als leichter" (Gee 1995).

Zielgerichtete Stammbäume werden weiter von Stammbüschen abgelöst, an deren Basis Grundtypen angenommen werden könnten.

Die neuen Funde eröffnen gleichzeitig den Blick in die umfangreiche Radiaton früher plio-pleistozäner Menschenaffenartiger. Dies bestätigt auch die lang bekannte Vermutung, daß die Anzahl hominoider Arten viel größer gewesen sein muß als bisher angenommen. Zielgerichtete Stammbäume werden weiter von Stammbüschen abgelöst, an deren Basis Grundtypen angenommen werden könnten.

Literatur

Aiello LC & Dean MC (1990) An Introduction to Human Evolutionary Anatomy. London: Academic Press.

Andrews P (1981) Species diversity and diet in monkeys and apes during the Miocene. In: Stringer CB (ed) Aspects of Human Evolution. London, pp 25-61.

Andrews P (1992) Evolution and environment in the Hominoidea. Nature *360,* 641-646.

Begun DR (1992) Miocene fossil hominids and the chimp-human clade. Science *257,* 1929-1933.

Brandt M (1995) Der Ursprung des aufrechten Ganges. Zur Fortbewegung der plio-pleistozänen Hominiden. Neuhausen: Hänssler, edition „pascal".

Coffing K, Feible C, Leakey M & Walker A (1994) Four-million-year-old hominids from East Lake Turkana, Kenya. Am. J. Phys. Anthropol. *93,* 55-65.

Ferguson WW (1989) Taxonomic status of the hominid mandible KNM-ER TI 13150 from the Middle Pliocene of Tabarin, in Kenya. Primates *30,* 383-387.

Fleagle JG, Rasmussen DT, Yirga S, Bown TM & Grine FE (1991) Current events: New hominid fossils from Fejej, Southern Ethiopia. J. Hum. Evol. *21,* 145-152.

Gee H (1995) Uprooting the human family tree. Nature *373,* 15.

Hartwig-Scherer S (1994) Lebte „Lucy" mit Familie doch auf Bäumen? Stud. Int. J. *1,* 11-14.

Hartwig-Scherer S & Martin RD (1991) Was „Lucy" more human than her „child"? Observations on early hominid postcranial skeletons. J. Hum. Evol. *21,* 439-449.

Heinrich RE, Rose MD, Leakey RE & Walker AC (1993) Hominid radius from the Middle Pliocene of Lake Turkana, Kenya. Am. J. Phys. Anthropol. *92,* 139-148.

Hill A (1985) Early hominid from Baringo, Kenya. Nature *315,* 222-224.

Hill A & Ward S (1988) Origin of the Hominidae: The record of African large hominoid evolution between 14 my and 4 my. Yearb. Phys. Anthropol. *31,* 49-83.

Hill A, Wards S & Brown B (1992) Anatomy and age of the Lothagam mandible. J. Hum. Evol. *22,* 439-451.

Johanson D (1995) President's report: Lucy's grandparents. Newsletter of the Institute of Human Origins *22,* 2-3.

Johanson DC, Masao FT, Eck GG, White TD, Walter RC, Kimbel WH, Asfaw B, Manega P, Ndessokia P & Suwa G (1987) New partial skeleton of *Homo habilis* from Olduvai Gorge, Tanzania. Nature *327,* 403-451.

Johanson DC & Taieb M (1976) Plio-Pleistocene hominid discoveries in Hadar, Ethiopia. Nature *260,* 293-297.

Johanson DC & White TD (1979) A systematic assessment of early African hominids. Science *203,* 321-330.

Kimbel WH, Johanson DC & Rak Y (1994) The first skull and other new discoveries of *Australopithecus afarensis* at Hadar, Ethiopia. Nature *368,* 449-452.

Moyà Solà S & Köhler M (1993) Recent discoveries of Dryopithecus shed new light on evolution of great apes. Nature *365,* 543-545.

Spoor CF, Wood BA & Zonneveld F (1994) Implications of early hominid labyrinthine morphology for evolution of human bipedal locomotion. Nature *369,* 645-648.

Susman RL, Stern JT & Jungers WL (1984) Arboreality and bipedality in the Hadar hominids. Folia primatol. *43,* 113-156.

Ungar PS, Walker A & Coffing K (1994) Reanalysis of the Lukeino Molar (KNM-LU 335). Am. J. Phys. Anthropol. *94,* 165-173.

White TD (1984) Pliocene hominids from the Middle Awash, Ethiopia. Cour. Forsch. Inst. Senckenberg *69,* 57-68.

White TD, Suwa AG, Hart WK, Walter RC, WoldeGabriel G, Heinzelin JD & Clark JD (1993) New discoveries of *Australopithecus* at Maka in Ethiopia. Nature *366,* 261-265.

White TD, Suwa G & Asfaw B (1994) *Australopithecus ramidus,* a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia. Nature *371,* 306-312.

White TD, Suwa G & Asfaw B (1995) Corrigendum: *Australopithecus ramidus,* a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia. Nature *375,* 88.

WoldeGabriel G, White TD, Suwa G, Renne P, Heinzelin Jd, Hart WK & Heiken G (1994) Ecological and temporal placement of early Pliocene hominids at Aramis, Ethiopia. Nature *371,* 330-333.

Wood B (1992) Early hominid species and speciation. J. Hum. Evol. *22,* 351-365.

Wood B (1994) The oldest hominid yet. Nature *371,* 280-281.

Wood BA (1991) Koobi Fora Research Project. Researches into Geology, Palaeotology & Human Origins. Vol. 4. Hominid Cranial Remains. Oxford.

Wood BA (1992) Origin and evolution of the genus *Homo.* Nature *355,* 783-790.

Wood BA, Wood C & Konigsberg L (1994) *Paranthropus boisei:* An example of evolutionary stasis? Am. J. Phys. Anthropol. *95,* 117-136.

Der rätselhafte Ursprung der Moose

Reinhard Junker, Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn

Zusammenfassung: **Der Ursprung der drei Moosklassen (Laubmoose, Lebermoose und Hornmoose) kann anhand von Fossilien nicht nachgezeichnet werden. Bereits die ältesten Fossilien können i. d. R. in heutige Ordnungen gestellt werden. Mögliche Gründe für die Seltenheit paläozoischer Moosfossilien werden diskutiert. Ein neu entdecktes unterdevonisches Fossil weist eine bis dahin unbekannte Kombination aus moosartigen und teilweise gefäßpflanzenartigen Merkmalen auf, erlaubt aber aufgrund der fragmentarischen Natur keine sichere Deutung seiner phylogenetischen Stellung.**

Die Moose (Abteilung Bryophyta) sind mit ca. 25.000 Arten weltweit verbreitet. Im Vergleich zu den Farn- und Samenpflanzen sind sie einfacher gebaut. Sie besitzen keine Wurzeln, sondern nur einfach gebaute Rhizoide (einzellige oder vielzellig unterteilte Schläuche), es fehlen ihnen auch Leitbündel (z. T. kommen vergleichsweise einfache Leitgewebe vor); die Blättchen sind meist einschichtig, die Cuticula (wachsartige Auflagerung als Verdunstungsschutz) ist sehr zart, Spaltöffnungen kommen selten vor; der für die Gefäßpflanzen typische Zellwandverstärker Lignin fehlt immer. Zur Befruchtung sind die Moose auf die Gegenwart von Wasser angewiesen. Trotz dieser für das Leben auf dem Land eher dürftig erscheinenden Ausrüstung sind die meisten Arten Landbewohner; einige Vertreter sind sogar ausgesprochen xerophytisch, d. h. sie besitzen eine große Widerstandsfähigkeit gegen Austrockung, und können daher sogar Extremstandorte wie die höchsten Stufen der Hochgebirge besiedeln. Ob man die Moose vor diesem Hintergrund als „weniger hoch entwickelt" charakterisieren möchte, ist eine Bewertungsfrage. Jedenfalls sind die Moose in der Lage, mit einfachen Mitteln eine große Zahl unterschiedlichster Standorte zu erobern. Als primitive Vorstufen von Höheren Pflanzen werden sie heute gewöhnlich nicht mehr angesehen.

Mit den Gefäßpflanzen (Farn- und Samenpflanzen) und untereinander haben die Moose gemeinsam:

- einen vielzelligen, von der Mutterpflanze ernährten Embryo (sie gehören daher zu den sog. Embryophyten)
- eine schützende Hülle um die Gametangien (Behälter für die Geschlechtszellen: Archegonien und Antheridien)
- einen ausgeprägten Generationswechsel (Abwechslung einer sporen- und gametenbildenden Generation, Sporophyt und Gametophyt; Abb. 1).

Im Unterschied zu den anderen Embryophyten ist bei den Moosen der Gametophyt (d. i. die Gameten = Geschlechtszellen bildende Generation) die klar dominierende Generation, wogegen er bei den Farnartigen und den Samenpflanzen relativ unscheinbar bis extrem reduziert ist. Zudem lebt der Sporophyt, also die Sporen produzierende Generation, zeitlebens schmarotzend auf dem Gametophyten und ist ohne ihn nicht lebensfähig (vgl. Abb. 1 und 2).

Die Moose werden gewöhnlich in drei Hauptgruppen unterteilt (Abb. 2), die sich in vielerlei Hinsicht voneinander unterscheiden. Es handelt sich um die Laubmoose (Klasse Bryopsida, z. T. auch als Unterabteilung Bryophytina gewertet), zu der ca. 2/3 aller Moose gehören, die Lebermoose (Hepaticopsida bzw. Hepaticophytina), die etwa 1/3 der Moose umfassen sowie die nur ca. 100 Arten umfassenden Hornmoose (Anthocerotopsida). Neuerdings wird diskutiert, ob aufgrund deutlich unterschiedlicher biochemischer, ultrastruktureller und morphogenetischer Eigenschaften als vierte Klasse bzw. Unterabteilung die Takakiophytina abzutrennen sind (Taylor & Taylor 1993, 135), deren Vertreter (die Gattung *Takakia*) bisher als Ordnung der Hepaticopsida zählten.

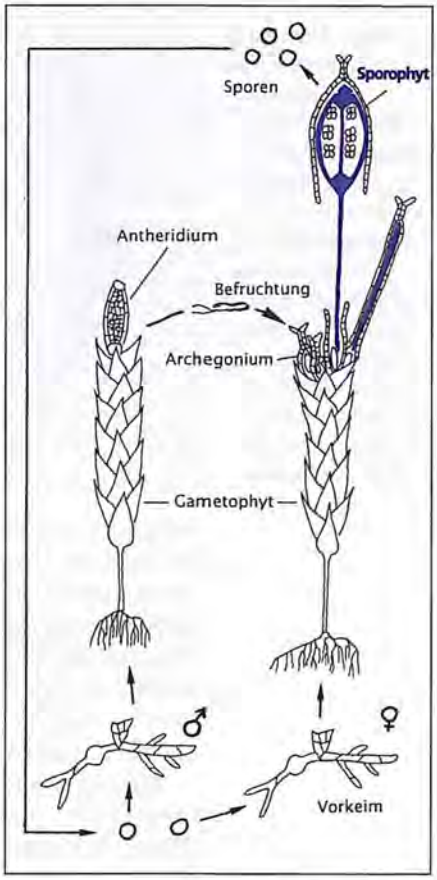


Abb. 1: Generationswechsel bei einem Laubmoos, schematisch. Die Sporophyten-Generation ist blau wiedergegeben. (Nach Bresinsky 1991, verändert)

Vergleichende Biologie

Auch wenn die Moosgruppen eine Reihe von Gemeinsamkeiten aufweisen (s. o.; vgl. Schuster 1984a), sprechen dennoch grundlegende Unterschiede in der Ontogenese bei den Laubmoosen, Lebermoosen und Hornmoosen für eine Polyphylie der Moose (Crandall-Stotler 1980, 580); die Meinungen hierüber gehen allerdings auseinander (vgl. Schuster 1984a). Unterschiedlich sind bei den Gametophyten die Art der Sporenkeimung, das Wachstum des Sproßscheitels, die Differenzierung der spezialisierten Gewebe des Stämmchens und die Embryogenese. „Clearly, mosses, hepatics, and anthocerotes possess distinctive morphogenetic

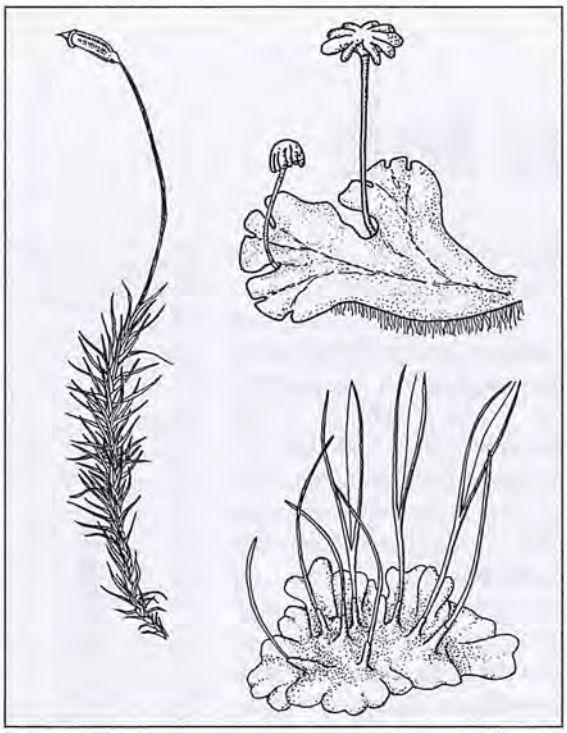


Abb. 2: Vertreter der drei Moosklassen: Links: das Laubmoos Polytrichum formosum *(Schönes Widertonmoos), rechts oben das Lebermoos* Marchantia polymorpha *mit Archegonienständen, unten das Hornmoos* Phaeoceros laevis *mit jungen und geöffneten Sporogonen (= auf dem flächigen Gametophyten aufsitzende Sporophyten). (Nach* AICHELE & SCHWEGLER *1978 und* BRESINSKY *1991)*

designs, regulated by genetic and physiological mechanisms as complex as those described for flowering plants" (CRANDALL-STOTLER 1980, 583). Die Entwicklungsmuster sind in allen Stadien des Wachstumszyklus, von der Sporenkeimung bis zur Sporenbildung, zwischen Laubmoosen und Lebermoosen verschieden (CRANDALL-STOTLER 1986, 18; vgl. CRANDALL-STOTLER 1984).

Ein eigenartiges Merkmalsmosaik weisen die Hornmoose (Anthocerotopsida) auf. BRESINSKY (1991, 649) hält sie für phylogenetische Relikte; allerdings besitzen sie neben „Primitivmerkmalen" auch Eigenschaften, die als abgeleitet gewertet werden können (Heterobathmie, d. i. Kombination „ursprünglicher" und „abgeleiteter" Merkmale): Ihr Sporogon (Sporophyt) weist einen reicher differenzierten Bau auf als das der anderen Moose; der als Kapsel angelegte Teil bleibt längere Zeit meristematisch (teilungsfähig); die Sporogonwand besitzt Spaltöffnungen; ihre Zellen haben Chloroplasten und sind bei der Reife der Sporophyten photosynthetisch aktiv (vgl. auch STEWART & ROTHWELL 1993, 77 und die Ausführungen bei BREMER 1985, 377f.). Es handelt sich um eine recht deutlich abgesetzte Gruppe. Ihre Entstehung wird als unabhängig von den anderen Moosgruppen angesehen (SCHUSTER 1984b, 1073).

Fossilfunde

Inwieweit gibt der Fossilbericht Auskunft über den Ursprung der Moose als Gesamtgruppe und über die genannten Moosklassen? FRAHM (1994) schildert die Situation in einer Überblicksarbeit, in der er die Moose pauschal als „lebende Fossilien" bezeichnet. „Selbst die ältesten bekannten fossilen Moose sind offensichtlich den heutigen äußerlich so ähnlich, daß sie ohne weiteres in rezente Familien oder selbst Gattungen gestellt werden können. Damit entfällt bei den Moosen die Möglichkeit, Hinweise über die Evolution aus Fossilien zu gewinnen." – „Die heutigen Ordnungen der Moose waren bereits im Paläozoikum differenziert" (FRAHM 1994, 120, 124). Die Zuordnung von paläozoischen Moosfunden ist allerdings nur vage zu Ordnungen oder sogar nur zu Unterklassen möglich, da wichtige Informationen fehlen: In der Regel handelt es sich bei Moosfossilien um vegetative Teile des Gametophyten; Sporophyten sind nur sehr selten dokumentiert und fossile Bryophyten mit identifizierbaren Geschlechtsorganen sind fast unbekannt (TAYLOR & TAYLOR 1993, 136; EDWARDS 1993, 775). – Das älteste sicher zuordenbare Lebermoos, *Pallavicinites* devonicus aus dem Oberdevon der USA (auf ca. 350 Millionen Jahre datiert) kann zu den heutigen Metzgeriales gestellt werden. Unter den fossilen Laubmoosen tritt *Muscites plumatus* stratigraphisch zuerst auf; diese Gattung wurde im Karbon gefunden und läßt sich den Bryales zuordnen. Die ältesten fossil dokumentierten Torfmoose aus dem Perm weisen die für Torfmoose typische Differenzierung der Blattzellen in assimilierende Chlorocyten (lebende, grüne Blattzellen) und Hyalozyten (tote, mit Wasser oder Luft gefüllte Zellen) auf. Da sie jedoch große Blätter mit Mittelrippe besitzen, werden sie in eine eigene Ordnung gestellt (Protosphagnales).

> „Die heutigen Ordnungen der Moose waren bereits im Paläozoikum differenziert"

Ab dem Mesozoikum kann die Mehrheit der Moose sogar heutigen Familien zugeordnet werden (EDWARDS 1993, 775). In der Terminologie der Grundtypenbiologie (vgl. SCHERER 1993, ADLER 1993) könnte man von einer Zuordnung zu Grundtypen sprechen. Dazu kommen Formen mit heute nicht mehr verwirklichten Merkmalskombinationen (FRAHM 1994, 121). Aus dem Känozoikum schließlich sind vergleichsweise viele Moose fossil überliefert, von denen fast alle auch heute vorkommen (FRAHM 1994, 121; ein Beispiel in Abb. 3).

Die Verbindung zwischen den Lebermoosen und den Laubmoosen ist rätselhaft. *Naiadita lanceolata* kombiniert zwar Merkmale aus beiden Gruppen, stammt aber aus der Trias (tritt also viel zu spät für eine Übergangsform auf), was nach Auffassung von STEWART & ROTHWELL (1993, 81) mehr Fragen bezüglich der Moos-Evolution auslöst als Antworten bringt. Es sind keine primitiven Typen bekannt, die als Vorfahren beider Gruppen angesehen werden könnten (STEWART & ROTHWELL 1993, 83). „Eine Form, die als gemeinsamer Vorfahr von Leber- und Laubmoosen in Frage kommt, ist... bis heute nicht bekannt" (SPECK 1988, 68).

Auch der Ursprung der Hornmoose ist ein ungelöstes Rätsel. Fossil sind die Anthocerotopsida fast unbekannt, nur tertiäre und evtl. kretazische Sporen wurden gefunden (LACEY 1969, 194; TAYLOR & TAYLOR 1993, 147). SCHUSTER (1984b, 1071) spekuliert, daß es sich bei den Hornmoosen um die letzten kümmerlichen Versuche handeln könnte, zu phylogenetisch später Zeit nochmals das Land zu erobern.

Weshalb fehlen die Zwischenformen?

Angesichts von insgesamt ca. 300.000 fossil bekannten Arten der gesamten Tier- und Pflanzenwelt wurde das Argument der Lückenhaftigkeit zur Erklärung für das Fehlen von Übergangsformen allgemein weitgehend aufgegeben; es ist unglaubwürdig. Im Falle der Moose freilich kann man auf die zarte Natur und die insgesamt geringe Zahl paläozoischer fossiler Belege verweisen, so daß hier das Argument der Lückenhaftigkeit doch stechen könnte. „Fossil evidence of liverworts and mosses in general is extremely scanty in the Devonian and Carboniferous and to date does not allow for a good assessment of evolutionary trends and relationships within or between those groups, or between bryophytes and vascular plants" (GENSEL & ANDREWS 1984, 112). Andererseits ist aber zu bedenken, daß ca. 70 Moos-Arten bereits aus dem Paläozoikum bekannt sind (FRAHM 1994, 120). Es gibt ja trotz ihrer zarten Natur zahlreiche Moosfossilien; es kommt also auf die richtige Art der Sedimentation in der richtigen Situation zur richtigen Zeit an (LACEY 1969, 190, 202); die zarte Natur der Moose alleine gibt keine Erklärung für Nicht-Erhaltung. Überzeugende Gründe, weshalb aus der Zeit, in der die Moose nach evolutionärer Sichtweise entstanden sein dürften (etwa Ordovizium-Silur), passende Fossilien fehlen, sind nicht bekannt.

Da Fossilien also keine Auskunft über den Ursprung der Moose und ihre Aufspaltung in die drei (oder vier) Hauptgruppen geben, ist man in der Evolutionsforschung weitgehend auf weitere vergleichend-biologische Studien angewiesen (Sequenzanalysen, ultrastrukturelle Analysen, anatomische Vergleiche etc.). Im letzten Jahrzehnt wurde hierzu eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die z. T. unterschiedliche Verwandtschaftsverhältnisse nahelegen. Einen aktuellen Einblick geben KRANZ et al. (1995) und GARBARY et al. (1993); an dieser Stelle gehen wird darauf nicht weiter ein.

Sporen und ein neues Fossil

Fossile Sporen, die u. a. auch Moosen zugeordnet werden könnten (Zuordnung von Sporen zu Makrofossilien ist oft unsicher), sind bereits aus dem Ordovizium bekannt (vgl. z.B. GRAY & SHEAR 1987), doch fehlen Nachweise passender Makrofossilien (Stengel, Blätter etc.) aus dieser Zeit. EDWARDS et al. (1995) berichteten kürzlich über die Entdeckung eines 1,54mm langen inkohlten Fossils aus dem walisischen Unterdevon, das glattwandige tetraedrische Tetraden enthält, die den ersten ordovizischen Tetraden ähneln. Damit liegt zum ersten Mal ein entsprechendes Makrofossil vor, allerdings stratigraphisch sehr viel später als die ersten Sporenfunde. Im Gesamten entspricht die Anatomie keinen bekannten Embryophyten. Eine Reihe von Einzelmerkmalen ähnelt hauptsächlich heutigen Gametophyten thallöser Lebermoose. Morphologisch besteht jedoch eher Ähnlichkeit zu Moos-Sporophyten; dazu paßt allerdings die Verzweigung des neuen Fossils nicht (Moos-Sporophyten sind außer im Falle von Mißbildungen immer unverzweigt). Längliche Zellen und röhrenförmige Elemente könnten als Vorstufen von Tracheiden interpretiert werden (EDWARDS et al. 1995). Nach Ansicht dieser Autoren gibt dieses Fossil mit neuartiger Organisation einen einzigartigen Eindruck von einer Organisationshöhe unterhalb der Stufe der Gefäßpflanzen wieder. Allerdings gehört das Fossil zu einem Zeitraum, da echte Gefäßpflanzen bereits überliefert sind („Psilophyten"). Ob aus diesem winzigen fossilen Bruchstück weitergehende Schlußfolgerungen gezogen werden können, wird die Zukunft erweisen müssen; weitere Funde werden benötigt. Die vorliegenden Daten lassen zuviele Deutungsmöglichkeiten offen.

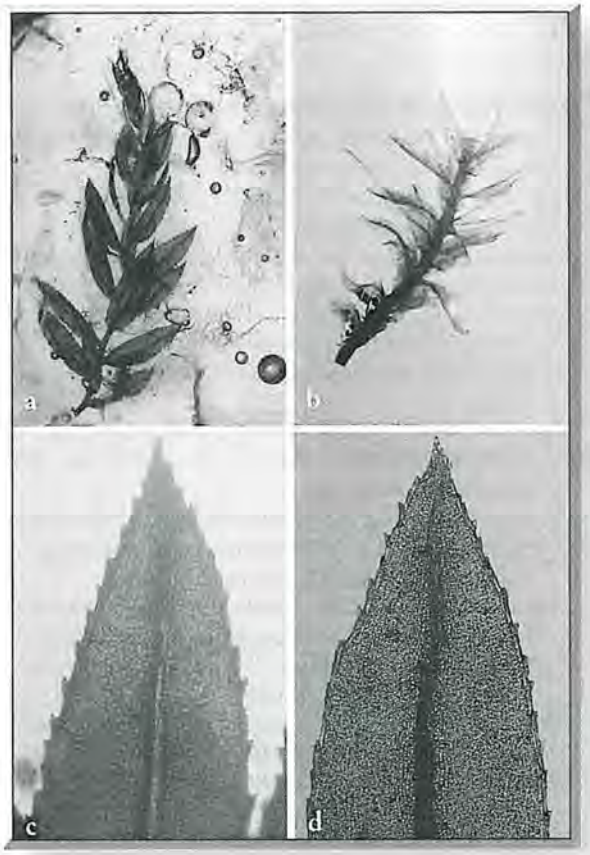


Abb. 3: Beispiel eines „lebenden Moosfossils":
a Trachycystis flagellaris *aus dem Baltischen Bernstein, Originalgröße 4 mm;*
b Trachycystis flagellaris, *rezent, aus Japan, Originalgröße 8 mm;*
c Blatt von fossilem Trachycystis flagellaris, *d rezentes Blatt (c, d ca. 90x vergrößert).*
Nachdruck aus: J.-P. Frahm: Moose – lebende Fossilien. Abb. 6, Biologie in unserer Zeit 24 (1994), Nr. 3. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung.

Literatur

ADLER M (1993) Merkmalsausbildung und Hybridisierung bei den Funariaceen (Bryophyta, Musci). In: SCHERER S (Hg) Typen des Lebens. Berlin, S. 67-70.

AICHELE D & SCHWEGLER H-W (1978) Unsere Moos- und Farnpflanzen. Stuttgart.

BREMER K (1985) Summary of green plant phylogeny and classification. Cladistics *1*, 369-385.

BRESINSKY A (1991) Eukaryota. In: SITTE P, ZIEGLER H, EHRENDORFER F & BRESINSKY A (Hg) Lehrbuch der Botanik, 33. Aufl. (begr. von E. Strasburger u. a.), Stuttgart – Jena – New York.

CRANDALL-STOTLER B (1980) Morphogenetic designs and a theory of bryophyte origins and divergence. Bio Science *30*, 580-585.

CRANDALL-STOTLER B (1986) Morphogenesis, developmental anatomy and bryophyte phylogenetics: Contraindications of monophyly. J. Bryol. *14*, 1-23.

CRANDALL-STOTLER B (1984) Musci, hepatics and anthocerotes – an essay on analogues. In: SCHUSTER RM (Hg) New manual of bryology. Vol. 2. Nichinan: Hattori Botanical Laboratory, pp 1093-1129.

EDWARDS D, DUCKETT JG & RICHARDSON JB (1995) Hepatic characters in the earliest land plants. Nature 374, 635-636.

FRAHM J-P (1994) Moose – lebende Fossilien. Biologie in unserer Zeit *24*, 120-124.

GARBARY WA, RENZAGLIA KS & DUCKETT JG (1993) The phylogeny of land plants: a cladistic analysis based on male gametogenesis. Pl. Syst. Evol. *188*, 237-269.

GENSEL PG & ANDREWS HN (1984) Plant Life in the Devonian. New York: Praeger.

GRAY J & SHEAR W (1992) Early life on land. Am. Sci. *80*, 444-456.

KRANZ HD, MIKS D, SIEGLER M-L, CAPESIUS I, SENSEN CW & HUSS VAR (1995) The origin of land plants: Phylogenetic relationships among charophytes, bryophytes, and vascular plants inferred from complete Small-Subunit Ribosomal RNA gene sequences. J. Mol. Evol. *41*, 74-84.

LACEY WS (1969) Fossil bryophytes. Biological Review *44*, 189-205.

SCHERER S (1993, Hg) Typen des Lebens. Berlin.

SCHUSTER RM (1984a) Evolution, phylogeny and classification of the Hepaticae. In: SCHUSTER RM (Hg): New manual of bryology. Vol. 2. Nichinan: Hattori Botanical Laboratory, pp 892-1070.

SCHUSTER RM (1984b) Morphology, phylogeny and classification of the Anthocerotae. In: SCHUSTER RM (Hg): New manual of bryology. Vol. 2. Nichinan: Hattori Botanical Laboratory, pp 1071-1092.

SPECK T (1988) Fernstudium Naturwissenschaften. Evolution der Pflanzen- und Tierwelt. 5/1 Geschichte der Pflanzen 2. Teil. Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen.

STEWART WN & ROTHWELL GW (1993) Palaeobotany and the evolution of plants. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press.

TAYLOR TN & TAYLOR EL (1993) The biology and evolution of fossil plants. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

Wie konstant sind die fundamentalen Naturkonstanten?

Thomas Portmann, Zur Zinsenbach 45, 57076 Siegen

Zusammenfassung: **Die problematische Bedeutung der Konstanz der fundamentalen Konstanten für die Schöpfungsforschung wird behandelt. Isotopengeologie und beobachtende Kosmologie legen ein Kosmosalter von größenordnungsmäßig 10^{10} Jahren nahe, wobei die raumzeitliche Unveränderlichkeit einiger Konstanten vorausgesetzt wird. Daher scheint eine Variabilität dieser Konstanten die Möglichkeit anzubieten, die empirischen Daten mit dem niedrigen Kosmosalter zu harmonisieren, das sich bei einem wörtlichen Verständnis aus der biblischen Überlieferung (den ersten Genesiskapiteln) ergibt. Es wird unter der exemplarischen Erläuterung einer empirischen Schranke und anhand allgemeiner Betrachtungen über den Charakter fundamentaler physikalischer Konstanten gezeigt, warum sich dieser Weg als Sackgasse erweist.**

Einführung

Abgesehen von der grundlegenden Bedeutung der Titelfrage für alle naturwissenschaftlichen Fakultäten spielt die Frage für Untersuchungen im Rahmen der Schöpfungslehre eine besonders problematische Rolle. Einerseits beruhen die radiometrischen Datierungen von terrestrischen und extraterrestrischen Gesteinen unter anderem auch auf der Konstanz der Zerfallsreihen radioaktiver Isotope und der Konstanz der Halbwertszeiten im Verlauf der Erdgeschichte. Die Datierungen hängen also unmittelbar von der Unveränderlichkeit der fundamentalen Konstanten ab, wie z.B. der Elementarteilchenmassen, der elektrischen Elementarladung, der Stärke der Kernkraft (starke Wechselwirkung), der Lichtgeschwindigkeit, der Planckschen Konstanten usw. Andererseits ergibt sich aus der beobachtenden Astronomie ein Bild des uns umgebenden Welt-

Stud. Int. J. 2 (1995), 68 – 80

alls mit bestimmten Aussagen über seine Ausdehnung und sein Alter. Diese Aussagen basieren ebenfalls empfindlich auf der Stabilität insbesondere der Lichtgeschwindigkeit. Das Problem besteht nun darin, die unter der Voraussetzung dieser Stabilität sich jeweils ergebenden und miteinander in gutem Einklang stehenden, unvorstellbar hohen Alter mit dem verhältnismäßig geringen Kosmosalter aus einer wörtlichen Auslegung der biblischen Überlieferung zu harmonisieren. Man vergegenwärtige sich einmal den Größenordnungsunterschied von mehr als *sechs Zehnerpotenzen,* mit dem ein Harmonisierungsversuch konfrontiert wird!

Vom Standpunkt der biblischen Schöpfungslehre ist eine Harmonisierung aber unbedingt notwendig. Dabei schließe ich die oft vorgeschlagene Lösung, der Schöpfer habe das Universum so geschaffen, daß die wissenschaftlichen Datierungen ein so hohes Alter vortäuschen, als Pseudolösung aus. Den Grund dafür möchte ich am Beispiel der riesigen Laufzeiten des Lichts entfernter Sterne, die sich aus der Annahme der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergeben und auch ein entsprechend hohes Kosmosalter nahelegen, einmal ausführen: Der Einwand, der Schöpfer habe das Licht auf seinem Wege zu uns vor ein paar tausend Jahren gleich miterschaffen, würde bedeuten, daß dasjenige Sternenlicht, das wir heute sehen, nie wirklich von dem betreffenden Stern ausgegangen wäre. Eine Supernova beispielsweise, die wir heute also nur deshalb sehen, weil sie etwa im heute beim irdischen Beobachter eintreffenden Licht durch die Hand des Schöpfers „aufgezeichnet" wurde (und zwar zum Zeitpunkt der Schöpfung zwischen explodiertem „Stern" und Beobachter), wäre nie geschehen, und der vor der Explosion sichtbar gewesene Stern hätte in dieser Form nie existiert. Das erscheint sowohl aus theologischen wie auch aus philosophischen Gründen unakzeptabel (Setterfield 1983).

Theologisch unakzeptabel ist diese Vorstellung, weil sie der Verantwortung widerspricht, in der wir mit der Schöpfungswirklichkeit umgehen, die uns durch unsere Sinne zugänglich ist. Zu diesem Umgang gehört insbesondere auch die Vorstellung, die wir aus unserer Sinneswahrnehmung entwickeln. Wir haben kein Recht dazu, sichtbare, historische Ereignisse, die in der Bibel als Wirklichkeiten angesprochen sind (Gott schuf die Sterne, die wir heute sehen, in ihrer geschichtlichen Wirklichkeit), zu negieren.

Das philosophische Problem ist erkenntnistheoretischer Art und ergibt sich daraus, daß diese Vorstellung prinzipiell nicht widerlegbar ist. Es ist aber nicht möglich, den Wahrheitsgehalt einer Theorie zu beurteilen, die Beobachtungsdaten beschreibt, wenn diese Theorie nicht prinzipiell falsifizierbar ist.

Möchte man an einem physikalisch jungen Universum festhalten, so wird daher eine echte Harmonisierung erforderlich. Mit genau diesem Ziel ist die Konstanz der fundamentalen Naturkonstanten in Frage gestellt worden. Es sind Szenarien vorgeschlagen worden, in denen die Konstanten früher einen so drastisch anderen Wert gehabt haben, daß die für radiometrische Datierungen relevanten empirischen Daten mit einem 10^4 Jahre alten Sonnensystem verträglich werden; entsprechendes gilt für die Lichtgeschwindigkeit und das Alter des Universums (Setterfield 1983; 1987). Eine Alternative mit drastischer Änderung der Lichtgeschwindigkeit findet man auch bei Troitskii (1987). Alle diese Szenarien mit starker Konstantenvariabilität stehen aber im Widerspruch zu längst etablierten empirischen Schranken für die zeitliche Änderung der fundamentalen Konstanten.

Das Anliegen dieses Artikels besteht darin, diesen Widerspruch zu bewerten, das heißt insbesondere, den Charakter und die Aussagekraft der etablierten Schranken verständlich zu machen. Daher werde ich mich auf die grundsätzliche Art der Argumentation des etablierten Ergebnisses konzentrieren und demgemäß aktuellere Untersuchungen ausblenden, da sie die Schranken im wesentlichen nur quantitativ weitertreiben (enger machen).

Der weitere Artikel ist folgendermaßen aufgebaut: Zunächst wird geklärt, was fundamentale Naturkonstanten im Vergleich zu anderen Konstanten sind und nach welchem Kriterium man eine Konstante als fundamental ansieht. Danach möchte ich auf das Problem einer bestimmten Freiheit in der Wahl der Einheiten (in diesem Aufsatz „Eichfreiheit" genannt) eingehen, die auch den Autoren der zu zitierenden Arbeiten (zumeist unausgesprochen) bewußt ist. Es stellt sich nämlich heraus, daß mehr fundamentale Konstanten in der Literatur ausgewiesen sind, als zur Naturbeschreibung erforderlich sind. Daraus ergibt sich die künstliche Möglichkeit, die Konstanten variieren zu lassen, ohne mit der Empirie in Widerspruch zu geraten. Diese Variationen entsprechen allerdings bloßen Umeichungen der Uhren, Maßstäbe usw. und haben keine physikalische Relevanz. Durch eine entsprechende Kritik wird es möglich, die wirklich relevanten Konstanten aufzuzählen, was dann auch geschehen soll. Im darauffolgenden Abschnitt werden dann einige empirische Schranken betrachtet. Abschließend folgt eine Diskussion zweier anderslautender Standpunkte.

Fundamentale Naturkonstanten

Die Variabilität der fundamentalen Konstanten ist in der Geschichte der modernen Physik immer wieder neu diskutiert worden. Dabei wurde klar, daß die Auswahl derjenigen Größen, die man als „fundamental konstant" annimmt, eigentlich nicht absolut getroffen werden kann. Vielmehr ist diese Cha-

Glossar

H_α-Linie: die langwelligste Linie aus der Balmer-Serie ($\lambda = 6.5628 \times 10^{-7}$m); das ist die einzige Serie mit sichtbaren Spektrallinien des Wasserstoffspektrums – z.B. des im heißen Lichtbogen angeregten Emissionsspektrums des Wasserstoffs.

Inertialsystem: ein Bezugssystem, in dem sich materielle Körper, auf die keine äußeren Kräfte wirken, geradlinig und gleichförmig bewegen. Ein Bezugssystem ist ein System von drei Raumkoordinaten und einer Zeitkoordinate; zumeist versteht man unter einem Inertialsystem insbesondere ein Inertialsystem mit kartesischen Raumkoordinaten. Zur physikalischen Realisierung eines Inertialsystems benötigt man einen Maßstab und eine Uhr. Da nach der Speziellen Relativitätstheorie die Vakuumlichtgeschwindigkeit c in allen Inertialsystemen denselben Wert hat, ist c ein immer und überall verfügbares Geschwindigkeitsmaß.

keV: „Kiloelektronenvolt" – eine in der Teilchenphysik gängige Energieeinheit für Teilchen. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es die Spannungsdifferenz von einem Volt durchläuft.

Leptonen, Quarks: nach der derzeitigen Theorie die fundamentalen Materiekonstituenten, d.h. diejenigen Elementarteilchen, aus denen die Materie aufgebaut ist. Das bekannteste Lepton ist das Elektron. Es ist das leichteste stabile Materieteilchen überhaupt, das eine Ruhemasse hat. Leptonen und Quarks sind Fermionen und genügen daher dem Paulischen Ausschließungsprinzip. Es gibt sechs Leptonen und sechs Quarks – und die Antiteilchen dazu. Leptonen und Quarks sind jeweils zu Familien à zwei zusammengefaßt. Der „Partner" des Elektrons ist das masselose Elektron Neutrino. Drei Leptonen, die Neutrinos, haben keine Masse. Das Proton (Wasserstoffatomkern) ist aus zwei „Up"-Quarks und einem „Down"-Quark zusammengesetzt, das Neutron aus einem „Up"-Quark und zwei „Down"-Quarks. „Up"-Quarks und „Down"-Quarks bilden die leichteste Familie. Quarks treten im Gegensatz zu Leptonen niemals einzeln auf, sondern immer in Bindung mit weiteren Quarks.

Paulisches Ausschließungsprinzip: Das Paulische Ausschließungsprinzip gilt für Fermionen und besagt, daß sich zwei identische Teilchen – etwa zwei Elektronen – niemals im gleichen quantenmechanischen Zustand befinden können. Es muß wenigstens eine Quantenzahl geben, in der sich zwei identische Fermionen unterscheiden müssen. Das Prinzip ist dafür verantwortlich, daß sich nicht alle Elektronen eines Atoms im Grundzustand (dem Zustand mit der niedrigsten Energie) aufhalten, sondern sukzessive „höhere" Zustände besetzen und so die Atomhülle aufbauen. Das Pauli-Prinzip ist daher die für Materie wohl typischste Eigenschaft: Es ist letztlich dafür verantwortlich, daß sich nicht zwei materielle Körper gleichzeitig am selben Ort aufhalten können. Lichtquanten sind Bosonen und gehorchen daher dem Pauli-Prinzip nicht.

Plancksche Konstante: Die Planck-Konstante ist eine Größe mit der Dimension Länge x Impuls bzw. Zeit x Energie. Diese Dimensionenkombination nennt man auch Wirkung. Man kann sich diese Konstante in gewissem Sinne als die kleinstmögliche Wirkung oder als die natürliche Einheit für die Wirkung vorstellen. Die bekannteste Beziehung, in der sie auftritt, ist die Formel für die Energie eines Lichtquants: $E = h\nu = \hbar\omega$; $\hbar = h/2\pi$, ν: Frequenz des Quants.

Rückwärtslichtkegel: Ein Lichtkegel ist ein vierdimensionales Gebilde. Er beschreibt die Raum-Zeit-Koordinaten der Lichtwelle eines Lichtblitzes im Verlauf der Zeit. Ein Lichtkegel ist also eine Kugeloberfläche, deren Radius sich mit Lichtgeschwindigkeit vergrößert. Ein Rückwärtslichtkegel ist ein zeitumgekehrter Lichtkegel: Er beschreibt die Raum-Zeit-Koordinaten einer Kugel-oberfläche, die zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort zusammenlaufen wird. Der Rückwärtslichtkegel eines Beobachters ist derjenige Lichtkegel, der im Beobachter zusammenläuft. Alle optisch beobachtbaren Ereignisse liegen also auf dem Rückwärtslichtkegel des Beobachters. Ereignisse, die innerhalb des Rückwärtslichtkegels liegen, sind optisch unbeobachtbar, wenn man eine Umlenkung des Lichtstrahls ausschließt. Ereignisse, die außerhalb des Rückwärtslichtkegels liegen, sind wegen Nicht-Überschreitbarkeit der Lichtgeschwindigkeit prinzipiell unbeobachtbar.

Schwarzer Strahler: Ein schwarzer Strahler ist ein ideal schwarzer Körper, d.h. ein Körper, der jedes einfallende Licht absorbiert. Diese Idealisierung läßt sich näherungsweise recht gut durch einen von innen rußgeschwärzten Kasten realisieren, in den man ein Loch bohrt – ein solches Loch absorbiert Licht sehr gut. Man kann theoretisch und experimentell zeigen, daß ein schwarzer Strahler auch Licht abstrahlt, und zwar mit einem Spektrum, das von der materiellen Realisierung des Strahlers vollkommen unabhängig ist und nur von der Temperatur des Strahlers abhängt.

Zweikörperproblem: ist das mechanische Anfangswertproblem für zwei Körper, die eine konservative Kraft aufeinander ausüben, die vom Abstand ihrer Schwerpunkte abhängt. Die bekanntesten Beispiele sind das Keplerproblem (Sonne-Planet, Gravitationskraft) und das Wasserstoffatom (Proton-Elektron, Coulomb-Anziehung).

rakterisierung erst durch eine spezifische Theorie gegeben. Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie haben in diesem Jahrhundert zu einem umfassenden, tiefgreifenden und quantitativen Verstehen des Aufbaus der Materie und der Struktur der Wechselwirkungen geführt. Mit einem konkreten Modell für die fundamentalen Wechselwirkungen hat man auch eine vorläufige Auswahl fundamentaler Konstanten getroffen.

Eine Konstante hat nicht nur einen zeitlich und räumlich stabilen Wert, sondern sie ist zumeist gleichzeitig der Ausdruck einer bestimmten Gesetzmäßigkeit. So läßt sich beispielsweise die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Charakteristikum der speziellen Relativitätstheorie verstehen, oder die Konstanz der Planck-Konstante als Ausdruck der Quantentheorie. Insofern man nun fundamentale Gesetzmäßigkeiten von daraus abgeleiteten Gesetzen oder auch von bloß empirischen Formeln unterscheiden kann, spricht man bei den durch fundamentale Gesetzmäßigkeiten charakterisierten Konstanten von fundamentalen physikalischen Konstanten (bzw. „fundamentalen Naturkonstanten") im Unterschied zu den Konstanten abgeleiteter Theorien. Die Konstanten abgeleiteter Theorien sind konsequenterweise durch die fundamentalen Konstanten ausdrückbar.

Ist die Charakterisierung einer Konstante als „fundamental" auf diese Weise geschehen, wird sie durch eine zugehörige Phänomenologie interpre-

tiert und schließlich – davon ausgehend – experimentell getestet. Einerseits ergibt sich aus dieser Situation, daß der experimentelle Test einer Größenkonstanz ein hervorragender Prüfstein für eine Theorie ist, die die Größe als Konstante enthält, andererseits bedeutet aber dieselbe Situation, daß jede Entscheidung für eine definierte Gruppe fundamentaler Konstanten vom Stand des wissenschaftlichen Fortschritts abhängig und damit vorläufig ist. Denn im Verlauf dieses Fortschritts werden alte Theorien zuweilen durch allgemeinere Theorien ersetzt, die ihre eigenen Konstanten haben (insofern sind die alten Theorien als Ableitungen aus den neuen interpretierbar), und es tauchen Beziehungen zwischen alten und neuen Konstanten auf. Dabei kann es sich erweisen, daß einige der alten Konstanten gar keine mehr sind. Ihre Variabilität und Abhängigkeit werden in diesem Fall jedoch durch ein aus der allgemeineren Theorie resultierendes Gesetz bestimmt.

Als Beispiel möchte ich das Wien-Verschiebungsgesetz nennen. Es beschreibt die Wellenlänge λ_{max}, bei der die Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers maximal ist, als umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur T des Strahlers:

$$\lambda_{max} T = b, \qquad (1)$$

wobei b eine empirische Konstante ist, die man nicht weiter ableiten und daher als fundamental ansehen konnte.

Als nun PLANCK durch seine Hypothese, daß das elektromagnetische Strahlungsfeld seine Energie bei der jeweiligen Frequenz ν nur in „Quanten" zu $E = h\nu$ aufnehmen und abgeben kann, die Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers als Funktion von der Wellenlänge (Spektrum) herleiten konnte, war auch die Beziehung (1) ableitbar, und die Konstante b wurde ausdrückbar als

$$b = \hbar c / xk \qquad (2)$$

($\hbar$: Planck-Konstante dividiert durch 2π, c: Vakuumlichtgeschwindigkeit, k: Boltzmann-Konstante, x = 0,7902. . .: eine bestimmte irrationale Zahl). Im Rahmen der Quantentheorie ist b also eine abgeleitete Konstante und keine fundamentale Naturkonstante mehr.

Empirische Daten werden also in einem theoretischen Rahmen interpretiert, und da die Auswahl bestimmter Konstanten als „fundamental" von diesem Rahmen abhängt, ist sie vom Stand der Forschung abhängig.

Trotzdem bleiben empirische Aussagen über die Konstanz oder Variabilität von Größen, die durch ihren jeweiligen theoretischen Rahmen gegeben sind, absolut, und die Genauigkeit einer solchen Aussage für eine bestimmte Größe kann sich in der Geschichte der Physik nur verbessern – ungeachtet der sich manchmal ergebenden Notwendigkeit, diese empirischen Aussagen in einen anderen Rahmen zu übersetzen.

Von grundlegender Bedeutung für Isotopengeologie, Geophysik und beobachtende Kosmologie sind also *empirisch gewonnene Schranken* für die mögliche Variabilität der heute als fundamental angesehenen Konstanten während der Erd- und späteren Kosmosgeschichte. Da man aus diesen Schranken erst das Kosmosalter ermitteln möchte, sollen sich die Schranken unabhängig von der Größenordnung des *tatsächlichen* Alters auf die ganze Geschichte beziehen. Für unsere Problemstellung interessant sind also Schranken der Art: Änderung des Wertes während der Erdgeschichte, und nicht: Änderung des Wertes pro Zeiteinheit. Die letztere Art würde uns nicht weiterhelfen, da wegen unserer Unkenntnis des tatsächlichen Alters der Rückschluß auf die Variation während der ganzen Geschichte fraglich wäre.

Zu genau dieser Fragestellung sind in den Sechziger Jahren physikalische Arbeiten veröffentlicht worden. Untersucht wurden dabei die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung (d.h. die elektrische Elementarladung bzw., was damit gleichbedeutend ist, die Feinstrukturkonstante α), die starke Wechselwirkung (verantwortlich für den Alphazerfall von Atomkernen), die schwache Wechselwirkung (verantwortlich für den Betazerfall) und das Massenverhältnis zwischen Protonen und Elektronen.

Eine sorgfältige Diskussion schloß am Ende jenes Jahrzehnts damit ab, daß die Variationen der diesbezüglichen Konstanten (mit Ausnahme der Gravitationskonstanten) sehr klein gewesen sein müssen. Sehr klein bedeutet dabei, daß die möglichen Änderungen vom Anfang der Erdgeschichte bis heute im Zehntelpromillebereich lagen. Im Abschnitt über empirische Schranken werde ich versuchen, die damaligen Argumente bezüglich der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung grob nachzuzeichnen. Sie sind in dieser Form bis heute gültig.

In den darauffolgenden Jahren ging es dann nur noch um eine Verkleinerung der Schranken. In den Ergebnissen bis heute liegen die noch möglichen Variationen innerhalb des Meßfehlers und sind damit nicht signifikant.

Eichfreiheit

Wenn man eine Messung machen will, braucht man Maßstäbe wie z.B. Längenmaßstäbe, Uhren und Gewichte. Die klassische, anschauliche Abstraktion idealer Maßstäbe ist eine Fiktion, mit der die moderne Physik aufgeräumt hat. So beginnen sowohl Relativitätstheorie wie auch Quantenmechanik bekanntlich mit einer kritischen Diskussion der realen Maßstäbe und des realen Meßprozesses. In einem vielleicht nicht ganz unähnlichen Sinne muß auch in unserem Fall darauf hingewiesen wer-

den, daß man dimensionsbehaftete Größen (das sind Größen, für deren Bestimmung wir Maßstäbe und somit auch Einheiten benötigen) nicht direkt „messen" kann. Die Messung solcher Größen ist eigentlich ein Vergleich mit einem realen Maßstab, und das eigentliche, wirklich beobachtete Meßergebnis ein *dimensionsloses* Größen*verhältnis*. Eine wissenschaftstheoretisch saubere Überlegung hat nun nicht nur das Verhalten der zu messenden Größe, sondern ebenso auch das Verhalten des realen Maßstabes zu erklären bzw. zu berücksichtigen. Eine Theorie hat beides gleichzeitig zu leisten und ihre Prognosen so weit wie möglich mit der Beobachtung vergleichbar zu machen. In diesem Zusammenhang bedeutet das: *Streng genommen sind Prognosen nur dann mit der Beobachtung vergleichbar, wenn sie dimensionslose Größenverhältnisse bzw. reine Zahlen zum Inhalt haben.*

Streng genommen sind Prognosen nur dann mit der Beobachtung vergleichbar, wenn sie dimensionslose Größenverhältnisse bzw. reine Zahlen zum Inhalt haben.

Die Messung einer dimensionsbehafteten Größe, also ihr Vergleich mit einem Maßstab, hat als dimensionslose Zahl die sogenannte Maßzahl zum Ergebnis. Die Konstanz oder mögliche Variabilität einer solchen Maßzahl für eine fundamentale Konstante muß mit einer gewissen Vorsicht interpretiert werden. Einerseits muß man bedenken, daß es mehr internationale Einheiten („Dimensionen") gibt, als man nach dem heutigen Stand der Forschung benötigt. Manche als fundamental ausgewiesene Konstanten sind nach aktuellem Stand nichts anderes als Umrechnungsfaktoren zwischen Einheiten – und somit gewissermaßen trivialerweise konstant, obwohl sie früher, d.h. außerhalb des heutigen theoretischen Rahmens, einen ganz eigenständigen Sinn hatten. Ein Paradebeispiel dafür ist die Lichtgeschwindigkeit, deren Maßzahl man inzwischen international festgesetzt hat, wodurch der internationale Längenmaßstab überflüssig wurde. Andererseits darf man nicht vergessen, daß man bei einer Änderung der fundamentalen Konstanten eine entsprechende Reaktion der Maßstäbe, Uhren usw. auf diese Änderung zu berücksichtigen hat, wobei man die Reaktion nach der heutigen Theorie vorhersagen könnte. Damit würden sich eben auch die Einheiten ändern, zu denen wir die Messung in Beziehung setzen.

Wegen dieser subtilen Zusammenhänge ist es erforderlich, sich genau Rechenschaft darüber zu geben, was man eigentlich meint, wenn man sagt, eine fundamentale Konstante erfahre eine Veränderung. Insbesondere muß man in hypothetischen Alternativvorstellungen, in denen man eine Änderung der Konstanten zuläßt, zusätzlich die Frage erörtern, ob eine solche Änderung überhaupt mit physikalischen Methoden meßbar wäre, oder ob sie ein unmeßbares Artefakt in der Hypothese ist. Dieses Artefakt nenne ich im folgenden auch „Eichfreiheit". Es stellt sich nämlich heraus, daß man tatsächlich fundamentale, dimensionsbehaftete Größen sozusagen „per Hand" ändern kann, ohne daß sich dadurch die Prognosen der Theorie für wirklich beobachtbare Phänomene ändern. Gerade die beiden im Abschnitt „Diskussion zweier anderslautender Standpunkte" erörterten Alternativen beruhen auf einer solchen Eichfreiheit.

In diesem Sinne möchte ich die übliche Darstellung

$$\textit{Größe} = \textit{Maßzahl} \times \textit{Einheit}$$

einmal etwas zugunsten der Denkweise

$$\textit{Größe} = \textit{Maßzahl} \times \textit{andere Größe}$$

in den Hintergrund stellen, um damit in Erinnerung zu rufen, daß eine Einheit nicht „vom Himmel fällt", sondern letztlich auch nichts als eine gleichberechtigte Größe ist, die sich vielleicht auch ändern kann.

Die geforderte Rechenschaft kann man sich zunächst nur ausgehend von einem bestimmten Forschungsstand geben. Zu diesem Zeitpunkt bieten sich dafür eigentlich nur die etablierten, modernen Grundlagen der Physik an: Die fundamentalen Wechselwirkungen, auf die man sich letztlich alle naturwissenschaftlichen Phänomene zurückgeführt denkt, werden durch das Standardmodell der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung und durch die Einsteinsche Gravitationstheorie beschrieben. Diese vier Theorien haben alle experimentellen Präzisionstests der vergangenen Jahre glänzend bestanden – sind also hart labor-getestet. Das konzeptionelle und mathematische Werkzeug zur Beschreibung dieser vier Wechselwirkungen liefern die zur relativistischen Quantenfeldtheorie vereinigte Quantenmechanik und Spezielle Relativitätstheorie.

Dieser theoretische Gesamtrahmen trifft bereits eine vollständige Auswahl fundamentaler Konstanten, darunter achtzehn dimensionslose Größen. Vier davon charakterisieren die Stärken der genannten Wechselwirkungen, wohingegen die verbleibenden vierzehn Zahlen u.a. Verhältnisse der Massen der fundamentalen Materiekonstituenten (Leptonen und Quarks) sind.

Um nun eine Kritik der Konstanz dieser Größen durchzuführen, darf man die genannten Theorien nicht streng voraussetzen, denn sonst hätte man bereits die Konstanz vorausgesetzt.[1] Man setzt für die folgende Untersuchung lediglich eine etablierte Definition der fundamentalen Konstanten und den empirischen Gesamtbefund voraus, daß zur Beschreibung aller bislang bekannten naturwis-

senschaftlichen Phänomene jener theoretische Gesamtrahmen ausreicht. Insbesondere gehört dazu auch die etablierte, empirisch hart getestete Vorstellung vom Aufbau der Materie, durch die der Bezug aller Phänomene zu den fundamentalen Größen hergestellt wird.[2] Dabei behält man sich vor, daß sich die Werte der Konstanten räumlich und zeitlich allmählich ändern können, während sie durch den gängigen Rahmen weiter gut definiert sind und die Zusammenhänge zwischen nicht-fundamentalen Größen trotzdem durch diesen Rahmen gut beschrieben werden, obwohl dieser streng genommen durch eine Konstantenvariabilität verbesserungsbedürftig wird.

Ich möchte im folgenden zeigen, wie unter der genannten Voraussetzung alle bekannten physikalischen Phänomene außer der Gravitation und der Kern- und Elementarteilchenphysik nur durch die Massen der Teilchen und durch die Feinstrukturkonstante α als die fundamentalen Konstanten charakterisiert sind. Alle anderen Konstanten sind entweder abgeleitet oder stehen im Zusammenhang mit einer Eichfreiheit.

Ich gehe in zwei Etappen vor: In der ersten Etappe sehe ich einmal vom Magnetismus (also auch der Ausbreitung von Licht) und natürlich von der Gravitation und den Kernkräften ab. Elektrische Kräfte und Quanteneffekte setze ich aber voraus. Wenn man sich den Aufbau der Materie vergegenwärtigt, bleiben einem zur Herstellung realer Maßstäbe, Uhren und Gewichte nur Objekte, deren raumzeitliche Abmessungen und Massen ganz bestimmte, physikalisch wohldefinierte, dimensionslose Vielfache der „atomaren Einheiten" sind. Hierzu zählt man nicht die Lichtgeschwindigkeit c, und in diesem Sinne denke ich nicht an die moderne Definition des Meters, die die Ausbreitung von Licht zugrundelegt.

„Physikalisch wohldefiniert" soll hier erstens heißen: Diese dimensionslosen Vielfachen haben etwas mit der Struktur des Aufbaus der Materie zu tun. Wenn man z.B. als Längenmaßstab die Kantenlänge eines fehlerfreien Kristalls benutzt, so ist diese Länge ein bestimmtes Vielfaches der Abmessung der Atome des Kristallgitters. Dieses Vielfache hängt von der Gitterstruktur und der Anzahl der Atome in der Kante ab; außerdem kann es noch von weiteren dimensionslosen Größen abhängen, wie zum Beispiel den Massenverhältnissen der involvierten Teilchen.

Zweitens soll „physikalisch wohldefiniert" heißen, daß man die entsprechenden Maßstäbe leicht und reproduzierbar präparieren kann.

Unter den atomaren Einheiten[3] versteht man als Längeneinheit den sog. Bohrschen Radius

$$a = \hbar^2/me^2, \qquad (3)$$

als Zeiteinheit $5/144\pi$ mal der Periodendauer der H_α-Linie (Balmer-Serie; dieser Bruchteil entspricht der reziproken Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms multipliziert mit $\hbar=h/2\pi$)

$$T = \hbar^3/me^4 \qquad (4)$$

und als Masseneinheit die reduzierte Masse des Zweikörperproblems Proton-Elektron[4] (Wasserstoff)

$$m=m_e m_p/(m_e+m_p) \qquad (5)$$

(m_e: Elektronmasse, m_p: Protonmasse).
Außerdem setze ich noch voraus, daß alle Verhältnisse aller Teilchenmassen konstant bleiben (s.o.), weil ich das der Kürze halber nicht ausführen möchte. Dies ist aber sowohl vom empirischen als auch vom theoretischen Standpunkt (Trägheitsgesetz) auch auf erdgeschichtlichen Zeitskalen eine ziemlich zwingende Annahme (Quellenangaben zu beiden Standpunkten siehe JORDAN 1971, S. 6). Es ist also gleichgültig, welche vorkommende Masse man als Referenzmasse benutzt, und die Wahl der Masse aus (5) ist daher gerechtfertigt.

Weiter ist es eine harte empirische Feststellung, daß das Paulische Ausschließungsprinzip gilt, woraus folgt, daß insbesondere die Massen und Ladungen zweier Fermionen (Protonen, Neutronen, Elektronen usw.) derselben Sorte streng identisch sein müssen. Auch in großen Entfernungen im Weltall muß das Pauli-Prinzip gelten, da wir von dort Spektren laborbekannter Atome empfangen; Atome sind aber nur stabil, wenn das Pauli-Prinzip gilt. Es ist daher sinnvoll, von einer Teilchenmasse als der Masse einer Teilchensorte bzw. einer Elementarladung als der Ladung einer Teilchensorte als *eindeutige Funktionen* $m(\mathbf{x},t)$, $e(\mathbf{x},t)$ von Ort und Zeit zu sprechen, so daß die atomaren Einheiten überall und immer – zwar a priori variabel, aber – eindeutig definiert sind (MISNER et al. 1970, S. 398f, JORDAN 1971, S. 4).

Aus den bisherigen Überlegungen folgt, daß man alle Größen auf eindeutige Weise aus e, m und $\hbar$ aufbauen kann. Umgekehrt kann man diese Größen mit Hilfe der Gl. (3) und (4) durch unsere atomaren Einheiten ausdrücken:

$$e^2 = ma^3/T^2,\ \hbar = ma^2/T,\ m = m\,. \qquad (6)$$

Aus den atomaren Einheiten lassen sich nun keine dimensionslosen Größen zusammensetzen. Den drei Konstanten e, m und $\hbar$ stehen drei Einheiten gegenüber; e, m und $\hbar$ lassen sich in unserem bisherigen Szenarium[5] mit nichts anderem in der Natur Vorkommenden außer sich selbst bzw. aus sich selbst aufgebauten, nicht mehr fundamentalen Systemgrößen vergleichen, mithin nicht messen. Beim Vergleich mit Systemgrößen mäße man nur das System. Die Messung des Bohrschen Radius a z.B. in Metern wäre nichts anderes eine Messung der Länge des Urmeters[6] in a, was uns nicht interessiert. Denn wir stellten bereits fest, daß die daraus resultierende Maßzahl nur von der Struktur des Festkörpers Urmeter und den Massenverhältnissen

der Teilchen abhängen kann; in Ermangelung anderer dimensionsloser fundamentaler Größen kann die Maßzahl von nichts anderem abhängen. Daher gibt sie keinen Aufschluß über irgendeine fundamentale Größe.

Eine Änderung von e, m und $\hbar$ läßt sich also unter der bisherigen Voraussetzung prinzipiell nicht messen. Könnte man nämlich die Änderung dieser Konstanten in Termini der atomaren Einheiten doch messen, so würde das eine Widerlegung von (6) und mithin der genannten Voraussetzungen bedeuten.

Zwar ist auch eine *gedachte,* simultane Variabilität aller obigen Größen in Termini fiktiver Einheiten *ohne Verletzung von* (6) „möglich", aber eben „unphysikalisch", weil prinzipiell unmeßbar und damit im physikalischen Sinne beliebig, ein Artefakt oder eine Definitionsfrage: man hat eine Art *Eichfreiheit,* die darin besteht, daß eine Änderung oder auch Umeichung obiger Größen in Termini fiktiver Einheiten nichts an der Eindeutigkeit der Prognosen bzw. Messungen von beobachtbaren Verhältnissen ändert, da (6) gilt.

Man kommt am Ende der ersten Etappe also zu dem Schluß, daß man aus den genannten Voraussetzungen noch keine fundamentale Konstante bekommen kann, von deren Variabilität oder Konstanz man physikalisch sinnvoll sprechen könnte – von den Teilchenmassenverhältnissen abgesehen.

In einer zweiten Etappe möchte ich nun den Magnetismus als zusätzliche Wechselwirkung hinzunehmen. Dies ist auch notwendig, denn beides, Elektrizität und Magnetismus, begründen erst eine Theorie des Lichtes (Elektrodynamik), die in der Lage ist, auch weiter voneinander entfernte Objekte in ihren Größen zu vergleichen. Sie zeichnet eine vom Inertialsystem unabhängige, physikalisch wohldefinierte Geschwindigkeit c (eine vierte Größe) aus, mit der man die Größe a/T, die die Dimension einer Geschwindigkeit hat, vergleicht und so genau eine dimensionslose Zahl

$$\alpha = a/cT = e^2/\hbar c = 1/137{,}0360\ldots \qquad (7)$$

bilden kann. Diese Zahl, genannt „Feinstrukturkonstante", kann man messen, was man letztlich ihrer Dimensionslosigkeit verdankt. Ihre Variabilität ist unter den genannten Voraussetzungen beobachtbar.

Die Feinstrukturkonstante ist erst diejenige physikalische Größe, die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung charakterisiert. Denn die anderen, dimensionsbehafteten Größen lieferten bislang nur ein Einheitensystem – mithin kein Charakteristikum der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Die oben genannte Eichfreiheit bleibt ungeachtet dessen weiter bestehen und könnte etwa dazu genutzt werden, eine evtl. Variabilität von α auf die Variabilität einer oder mehrerer anderer Größen zurückzuführen – oder besser gesagt: zu „schieben"; denn es handelt sich dabei in jedem Fall um einen *willkürlichen Akt.* So wird übrigens in der Literatur oft und gern von der Änderung von e^2 (unter stillschweigender Konstanz von $\hbar$ und c) gesprochen. Für die Autoren versteht es sich aber immer von selbst, daß sie eigentlich α meinen (vgl. etwa den ersten Satz im Artikel von von Bahcall & Schmidt 1967).

Man beendet die zweite Etappe also mit dem Ergebnis, daß alle physikalischen Phänomene außer der Gravitation, der starken und der schwachen Kräfte durch die Teilchenmassenverhältnisse und die Feinstrukturkonstante (Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung) charakterisiert sind.

Am naheliegenden Beispiel des Wasserstoffatoms möchte ich zeigen, wie es möglich ist, α zu messen. Denn das ist instruktiv zum Verständnis der empirischen Schranke für α, die man aus einem astronomischen Atomspektrum gewinnt.

Es ist bezeichnend, daß die Messung von α auf die Beobachtung eines relativistischen bzw. magnetischen Phänomens hinausläuft.

So tritt im Spektrum des Wasserstoffs eine Aufspaltung der Spektrallinien (Feinstruktur) auf, die durch die Dirac-Theorie (relativistische Theorie für Teilchen mit Spin 1/2) in guter Übereinstimmung mit der Beobachtung vorausgesagt wird. Das Zweikörperproblem des Wasserstoffs ist in der Dirac-Theorie mit folgendem Ergebnis für die Energieniveaus noch geschlossen lösbar (vgl. Itzykson & Zuber 1980):

$$E_{nj} = \frac{mc^2}{\sqrt{1+\left(\dfrac{\alpha}{n-\delta_j}\right)^2}} \quad , \qquad (8)$$

wobei $\delta_j = j + 1/2 - [(j+1/2)^2 - \alpha^2]^{1/2}$; $n = 1, 2, \ldots$ ist die Hauptquantenzahl und j die Quantenzahl für den Gesamtdrehimpuls (Bahndrehimpuls und Spin: $j = 1/2, 3/2, \ldots, n - 1/2$). Eine Potenzreihenentwicklung in α, deren Abbruch schon nach wenigen Termen wegen $\alpha \ll 1$ eine gute Näherung darstellt, und anschließendes Einsetzen von (7) ergibt

$$E_{nj} = mc^2 - \frac{m\,(a/T)^2}{2\,n^2} - \frac{m\,(a/T)^4}{n^3(2j+1)\,c^2} + \frac{3\,m\,(a/T)^4}{8\,n^4\,c^2} + \mathcal{O}\left((a/T)^6\right) \quad . \qquad (9)$$

Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung ist eine für unsere Betrachtung irrelevante Ruheenergie. Irrelevant ist sie, weil man im Spektrum ohnehin nur die Energie*differenzen* $\Delta E = E_{n'j'} - E_{nj}$ zwischen den Niveaus beobachten kann – sie werden in Form von Lichtquanten mit der Frequenz $\nu = \Delta E/h$ beim Übergang zwischen den Zuständen mit den Quantenzahlen n, j und n', j' abgegeben (oder bei Absorptionsspektren aufgenommen) und bilden so das beobachtbare Spektrum.

Der zweite Term ist nichts anderes als das bekannte Ergebnis der nichtrelativistischen Quantentheorie, das von der Lichtgeschwindigkeit nicht abhängt und die Entartung[7] der Niveaus zeigt. Erst die relativistische Korrektur (die Terme ab dem dritten) bringt eine *lichtgeschwindigkeitsabhängige Aufspaltung der Niveaus* nach der Drehimpulsquantenzahl j, die man auch bei allen anderen

Atomen beobachtet und als Konsequenz der Spin-Bahn- und Spin-Spin-Wechselwirkung auffassen kann, die ja magnetisch ist. Diese relativistische Niveau-Aufspaltung, die wegen $\alpha^2 \ll 1$ relativ geringfügig ist, nennt man „Feinstruktur".

Zur Messung von α kann erst diese Feinstruktur dienen, da erst sie den Vergleich von a/T mit der Lichtgeschwindigkeit c zuläßt. Das nichtrelativistische, entartete Spektrum (der zweite Term) allein liefert für α keine Information, denn die entsprechenden Energiedifferenzen sind einfach nur rationale Zahlen der Gestalt $1/2n^2 - 1/2n'^2$, wenn man sie in der atomaren Energieeinheit $m(a/T)^2$ mißt – und eine andere Einheit steht uns bislang nicht zur Verfügung. Erst die Energiedifferenzen der Feinstruktur, in derselben Einheit gemessen, sind von der Ordnung α^2. Daher rührt auch der Name „Feinstrukturkonstante" für α.

Nach diesem Beispiel möchte ich auf eine Konsequenz der Eichfreiheit für den Umgang mit fundamentalen Konstanten zu sprechen kommen, und zwar auf eine Unterteilung der fundamentalen Konstanten in zwei Klassen (vgl. MELNIKOV 1993).

Die erste Klasse umfaßt Größen, die nichts als Umrechnungsfaktoren in verschiedene Einheitensysteme darstellen und damit der Eichfreiheit Rechnung tragen. In unserem Beispiel ordne ich drei dimensionsbehaftete von insgesamt vier Größen (z.B. $\hbar$, c, m) dieser ersten Klasse zu $e = (\hbar c \alpha)^{1/2}$ kann man jetzt als nicht-fundamental, also als von den anderen Größen abhängig betrachten – man kann natürlich auch eine andere Wahl treffen. Unabhängig von der konkreten Wahl darf man aber aus den Konstanten der ersten Klasse allein keine dimensionslosen Zahlen bilden können.).

Die zweite Klasse umfaßt diejenigen Größen, deren Wert im obigen Sinne wirklich gemessen werden kann und die daher notwendigerweise dimensionslos sein müssen. Bis jetzt gehören nur α und alle Teilchenmassenverhältnisse dazu.

In der weiteren Entwicklung der Elementarteilchenphysik hat man außer der Gravitation und dem Elektromagnetismus weitere zwei fundamentale Wechselwirkungen entdeckt, die jede wie die elektromagnetische Wechselwirkung eine entsprechende Kopplungsstärke im Standardmodell der starken und elektroschwachen Wechselwirkung bekommen: die schwache G_F, die starke α_s. Diese Kopplungsstärken des Standardmodells und der Gravitation,

$$\alpha,\ \beta,\ \alpha_s,\ \gamma$$

($\beta = G_F m^2 c/\hbar^3$; $\gamma = Gm^2/\hbar c$, G: Newtonsche Gravitationskonstante) und die Massenverhältnisse aller fundamentalen Konstituenten (Elementarteilchen, aus denen alle anderen Teilchen zusammengesetzt sind) gehören heute in jene zweite Klasse, und *nur die Konstanz bzw. Variabilität der Konstanten dieser Klasse läßt sich im Rahmen des Standardmodells sinnvoll empirisch testen.* Es handelt sich genau um jene achtzehn dimensionslosen Größen, die am Anfang dieses Abschnitts erwähnt wurden.

Der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, daß G_F und G dimensionsbehaftet sind.[8] Daher bildet man gemäß einem Vorschlag von DYSON (1972) aus ihnen mit Hilfe der Konstanten aus der ersten Klasse die dimensionslosen Kombinationen β und γ, so wie ja auch α aus e^2 gebildet wurde. Das ist auf eindeutige Weise möglich. Die Zahlen α, β und γ sind daher die Maßzahlen der Größen e^2, G_F und G für diejenigen Einheiten, die man als Größen aus den Konstanten aus der ersten Klasse bilden kann.

Wenn ich also im folgenden in laxer Weise davon sprechen werde, daß eine dimensionsbehaftete Größe konstant sei, so tue ich das übereinstimmend mit der allgemeinen Sprechweise in dem Sinne, daß sie konstant sei in den Einheiten der Konstanten der ersten Klasse ($\hbar$, c, m). Die Längeneinheit dieses Einheitensystems ist

$$\lambda = \hbar/mc = \alpha a, \tag{10}$$

die Zeiteinheit

$$\tau = \hbar/mc^2 = \alpha^2 T, \tag{11}$$

die Masseneinheit wähle ich nach wie vor als m. Diese Sprechweise ist insofern gerechtfertigt, als wir in diesem Abschnitt gesehen haben, daß es wegen der Eichfreiheit keinen Sinn ergibt, von einer Variation der Konstanten aus der ersten Klasse zu sprechen. In dieser Sprechweise ist es dann z.B. gleichgültig, ob ich von der Konstanz von α oder von e^2 spreche usw. Erfahrungsgemäß geben Autoren, die eine andere, mögliche Wahl der Konstanten in der ersten Klasse vornehmen, diese Wahl explizit an.

Am Ende dieses Abschnitts möchte ich noch bemerken, daß nicht jede der erwähnten achtzehn dimensionslosen, fundamentalen Konstanten eine der vier o.g. Kopplungsstärken oder ein Massenverhältnis ist. Vier der achtzehn Parameter beschreiben, in welchem Maße die schwache Wechselwirkung Übergänge zwischen verschiedenen Quark-Familien ermöglicht.[9] Weder für diese Parameter noch für die Massen der schwereren Quark-Familien habe ich empirische Schranken im Sinne dieses Aufsatzes in der Literatur gefunden. Es muß aber betont werden, daß sie weder für die radiometrischen Datierungsmethoden noch für die beobachtende Kosmologie eine Rolle spielen, da die stabile Materie nur aus Quarks der leichtesten Quark-Familie aufgebaut ist. Erst für die Teilchenphysik bei sehr hohen Teilchenenergien, wie sie für die Beschreibung der Prozesse in den Teilchenbeschleunigern oder zu frühen Zeitpunkten in den Urknallkosmologien herangezogen werden muß, werden jene vier Parameter relevant.

Empirische Schranken

Ich möchte jetzt am Beispiel von konkreten empirischen Schranken für α und zweier Argumente für die Konstanz von α_s zeigen, in welchem Sinn und

Ausmaß und mit welcher Stringenz man heutzutage von der Konstanz der fundamentalen Naturkonstanten auf erdgeschichtlichen Zeitskalen sprechen kann. Von diesen historisch wichtigen Ergebnissen führt eine argumentative Leiter zu sukzessiven Verbesserungen der Schranken für relevante Konstanten der zweiten Klasse mit Hilfe ganz unterschiedlicher Methoden. Darauf will ich nicht eingehen. Auch für die Betrachtung der heute etablierten Schranke für β möchte ich auf die Literatur verweisen (einige Hinweise findet man bei MELNIKOV 1993).

Wenn man so will, hat man eine Lichtgeschwindigkeitsmessung im Objekt mit den atomaren Einheiten dieses Objektes gemacht.

Das klassische Argument für eine enge empirische Schranke für die Änderung von α liefern Feinstrukturspektren weit entfernter astronomischer Objekte. Deren Licht war lange unterwegs, so daß wir bei ihrer Beobachtung weit in die Vergangenheit des Universums zurückblicken. Eine besonders strenge[10] Überprüfung der Konstanz von α präsentierten BAHCALL & SCHMIDT (1967) durch Betrachtung eines Feinstrukturlinienpaares von OIII-Emissionsspektren von fünf verschiedenen Radiogalaxien bei einer Rotverschiebung von etwa $\Delta\lambda/\lambda \approx 0{,}2$ (entspricht nach dem damaligen Literaturwert der Hubble-Konstanten etwa einem Abstand von 2×10^9 Lichtjahren). Sie fanden eine relative Variation von

$$\frac{\alpha_{\text{Objekt}}}{\alpha_{\text{Labor}}} = 1{,}001 \pm 0{,}002. \qquad (12)$$

Das Bezeichnende an der Bestimmung von α_{Objekt} ist, daß es den Abstands*verhältnissen* der Spektrallinien der Spektren der weit entfernten Objekte *absolut* entnommen werden kann, d.h. z.B. unbeeinflußt von der Rotverschiebung. Man hat also die dimensionslose Zahl α_{Objekt} am Objekt gemessen, ohne irgendwelche Labormaßstäbe zu benutzen. *Wenn man so will, hat man eine Lichtgeschwindigkeitsmessung im Objekt mit den atomaren Einheiten dieses Objektes gemacht,* da gemäß (7) die Feinstrukturkonstante nichts anderes als das Verhältnis der „atomaren Geschwindigkeit" a/T zur Lichtgeschwindigkeit c ist.

Somit hat man ferner eine Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c in atomaren Einheiten (3) und (4) für den gesamten kosmologischen Rückwärtslichtkegel vom heutigen Beobachter bis zum Objekt etabliert.[11]

Die Schranke (12) bezieht sich, wie eingangs gefordert, nicht auf eine Zeiteinheit, sondern auf eine ganz bestimmte Geschichte, nämlich einen Zeitraum, der dadurch gegeben ist, daß das Licht des beobachteten Spektrums größenordnungsmäßig 10^{22}km zurückgelegt hat. Aus der aus der Schranke resultierenden Konstanz der Lichtgeschwindigkeit während dieser Geschichte, gemessen in atomaren Einheiten, ergibt sich eine Laufzeit des Lichts von 2×10^9a und daraus auch eine Schranke für die relative zeitliche Änderung von α von

$$\left|\frac{\dot{\alpha}}{\alpha}\right| < 1/10^{12}\text{a} \qquad (13)$$

(a: Jahr), d.h. ein Milliardstel Promille pro Jahr. Anders formuliert bedeutet das, jetzt in laxer Redeweise, eine entsprechende Konstanz der atomaren Einheiten, s. (10) und (11).

An dieser Stelle möchte ich dem Einwand begegnen, man könne doch keine Größe an einem so entfernten Objekt messen, vielmehr habe man nur die Feinstruktur eines Spektrums vermessen, das man hier und jetzt beobachtet hat – also müsse man sauber zwischen α_{Objekt} und α_{Messung} unterscheiden.

Prinzipiell ist dieser Einwand richtig. Wenn es aber einen sinnvollen Unterschied zwischen α_{Objekt} und α_{Messung} geben sollte, dann müßte dieser Unterschied dadurch zustande kommen, daß das Spektrum auf dem Wege zum Beobachter verzerrt wurde oder aber erst auf dem Weg zum Beobachter in dieser Form entstand. Im ersteren Fall müßte es aber notwendigerweise eine aus physikalischen Effekten kommende Verzerrungsvorschrift von Spektren geben, die im Endeffekt Spektren entstehen läßt, die bis auf eine Rotverschiebung wie die Spektren aussehen, die mich auf sehr kurzem Wege (Labor) erreichen.

Lassen wir nun einmal die Möglichkeit zu, Spektren zu empfangen, die auf einen anderen Wert für α führen würden. Wenn es aber überhaupt einen Sinn haben soll, von einer „Feinstrukturkonstanten" im Meßobjekt *und* im Spektrum zu reden, so ist die Verzerrungsvorschrift dadurch eingeschränkt, daß sie während des ganzen Weges vom Meßobjekt bis zum Beobachter die Feinstruktur erhalten, aber das Ausmaß derselben ändern soll. Diese Verzerrung müßte für jedes Spektrum bei jeder Rotverschiebung simultan bewirkt werden. Es müßten also Frequenzverhältnisse unabhängig von der Frequenz, aber abhängig von der Linie und ihrer Zugehörigkeit zu einem Spektrum variieren. Das aber ist unmöglich, wenn das verzerrende Medium, mag es so „böswillig genial" sein, wie es will, nichts über die Zugehörigkeit eines Photons zu einer Spektrallinie und deren Zugehörigkeit zu einer Lichtquelle „weiß". Ein Lichtquant ist aber allein durch seine Richtung, Wellenlänge und seine Polarisation festgelegt und wechselwirkt nicht mit anderen Photonen. Daher kann es keine Information der benötigten Art tragen, denn das ginge über seine aufgezählten Eigenschaften hinaus.

Eine Verzerrung über die Rotverschiebung hinaus kann also nur frequenz-, polarisations- und rich-

tungsabhängig geschehen. Dabei könnte aber α_{Objekt} solange rekonstruiert werden, wie man das Spektrum überhaupt als Spektrum eines Atoms identifizieren könnte. Eine Unterscheidung von $\alpha_{Messung}$ ist daher sinnlos. Abgesehen davon wird eine solche Verzerrung nicht beobachtet.

Die nächste Schranke, die ich nennen möchte, stammt von DYSON (1967, 1972) und basiert auf irdischem Vorkommen von Re^{187}, das durch einen β-Zerfall in Os^{187} zerfällt. DYSONS Argumentation liefert eine um drei Zehnerpotenzen engere Schranke

$$\left|\frac{\dot{\alpha}}{\alpha}\right| < 5/10^{15}\text{a} \qquad (14)$$

diese beruht aber, wie er selbst zugibt, erstens auf der absoluten Konstanz von α_s und zweitens auf der Annahme eines Mindestalters der Erde von einer bis drei Milliarden Jahren.

Trotzdem handelt es sich argumentativ um einen sehr wichtigen Beitrag: Er zeigt die starke Verzahnung der Konstanz von α mit der Konstanz der Kopplungsstärke α_s der starken Wechselwirkung auf, die sich aus der Kernphysik ergibt: Würde sich das Verhältnis dieser beiden Konstanten auch nur geringfügig geändert haben, so wäre wegen der sich daraus ergebenden starken Verkürzung der Halbwertszeit mit dem irdischen Vorkommen einer der beiden genannten Isotope nicht zu rechnen. Der wesentliche Punkt ist, daß die geringe Energiedifferenz zwischen den beiden Isotopen (2,6 keV) gleichzeitig eine Differenz zwischen zwei großen Energien ist, nämlich zwischen der Isotopendifferenz der anziehenden Kernkraft und der der Coulomb-Abstoßung, wobei nur die letztere von e^2 abhängt. Daher kann die Energiedifferenz nur klein bleiben für einen schmalen Wertebereich für e^2 bzw. α. Die Zerfallsrate verhält sich aber wenigstens wie die Energiedifferenz, potenziert mit 2,835. Eine andere Überlegung mit einem betragsmäßig ähnlichen Ergebnis gilt für den Fall, daß die Energiedifferenz negativ werden sollte. (Dann zerfällt Os^{187} durch Elektroneneinfang in Re^{187}.) Aus der Änderung der Coulomb-Energiedifferenz zwischen den beiden Isotopen mit α, der derzeitigen Halbwertszeit von Re^{187} (4×10^{10}a) und dem Mindestalter der Erde schließt man auf die Schranke (14).

Auch wenn man die beiden im Rahmen dieses Aufsatzes unerwünschten Voraussetzungen fallen läßt, lohnt sich die Betrachtung dieser Art von langlebigen β-Zerfällen. Verkürzt man das Mindestalter der Erde von 10^9a auf 10^4a, so würde Re^{187} immerhin auch dann nicht überlebt haben, wenn α vor 10^4a einen um etwa 10% kleineren Wert gehabt hätte. Drastische Änderungen läßt dieser Befund also auch in einem Kurzzeitmodell nicht zu.

Läßt man nun noch Variationen von α_s zu, so würde DYSONS Argument genau dann fehlschlagen, wenn beide Kopplungskonstanten präzise in der Weise variiert hätten, daß „the delicate balance" (wie DYSON sagt) zwischen den beiden Isotopenenergien bewahrt worden wäre. Das scheint aber mehr als unwahrscheinlich zu sein, da die Kernbindungsenergie eine stark nichtlineare Funktion von α_s ist, wohingegen die Coulomb-Energie in dem in Frage kommenden schmalen Wertebereich für α nahezu linear mit α geht. Bedenkt man nun, daß es noch andere β-aktive Kerne gibt, die eine starke Variation von α ebenfalls nicht überlebt hätten (z.B. V^{60}, Rb^{87}, Te^{123}, La^{138} und Lu^{176}), so scheint es nahezu unmöglich zu sein, daß eine solche Balance in all diesen Fällen gleichzeitig erhalten werden kann.

Nimmt man die Schranke (13) auch für die Vergangenheit auf der Erde ernst (und nicht nur *auf* dem kosmologischen Rückwärtslichtkegel), so folgt aus DYSONS Betrachtung andererseits also eine Schranke für α_s. Diese wäre in einem Kurzzeitmodell zwar nicht so eng wie (13), aber für eine drastische Variation bleibt hier wiederum kein Platz.

Außerdem sei darauf hingewiesen, daß man aus der Beobachtung von radioaktiven Strahlungshöfen im Gestein weiß, daß die Reichweiten von Alphastrahlern – lax gesprochen – geologisch konstant sind (JORDAN 1971, S. 6f). Daraus folgt, daß das Verhältnis von Kernenergien und Ionisierungsenergien und mithin zwischen α_s und α während der Erdgeschichte konstant gewesen ist. Aus der absoluten Konstanz beider Kopplungsstärken schließt man dann auf die Konstanz der Halbwertszeiten und der Zerfallsreihen überhaupt.

Für weitergehende Literatur wird auf MELNIKOV (1993) und die Quellenangaben bei JORDAN, DYSON, BAHCALL & SCHMIDT und TROITSKII (1987), Tabelle I, verwiesen. Bei MELNIKOV findet man auch den aktuellen Stand der Forschungsergebnisse und Schranken in diesem Bereich.

Abgesehen von der heutigen Renaissance der Diskussion um die Konstantenvariabilität während des „frühen Universums", die keinen empirischen, sondern spekulativen Charakter hat[12], lautet der allgemein akzeptierte Schluß, daß die einzige Konstante, die während der Erdgeschichte eine nennenswerte Änderung erfahren haben kann, die Gravitationskonstante (bzw. genauer: γ) ist. Alle anderen berühmten Spekulationen von GAMOW, TELLER, LANDAU, DEWITT usw. (vgl. MELNIKOV 1993), sind bereits ausgeschlossen worden.

Diskussion zweier anderslautender Standpunkte

Inspiriert von G. GAMOW (1967), auf den sich übrigens alle o.g. Autoren beziehen und der seinen Vorschlag zur Variabilität von e^2 (bzw. α) längst wieder zurückgezogen hat, hat nun V.S. TROITSKII (1987) vorgeschlagen, man könne e, $\hbar$, m, c, die „Ladungen"

der schwachen und starken Wechselwirkung und die Gravitationskonstante als simultan variabel ansehen dergestalt, daß die dimensionslosen Kopplungsstärken α, β, α_s, γ stets konstant geblieben sind (um den z.T. oben zitierten Veröffentlichungen Rechnung zu tragen). Er betrachtet ein kosmologisches Modell mit veränderlicher Lichtgeschwindigkeit und einer zur Standardkosmologie konformen Metrik, in der u.U. die Größe des Universums konstant geblieben ist, und interpretiert Beobachtungen wie z.B. die Hubble-Beziehung (Rotverschiebung versus Abstand) in diesem Modell, um eine empirische Evidenz zu erhalten.

Nach obigem ist zu diesem Vorschlag folgendes zu sagen: Da TROITSKII die Konstanz der dimensionslosen Kopplungsstärken, also der einzigen „Konstanten", deren Veränderlichkeit man maßstabsunabhängig messen kann, aus den bekannten Gründen akzeptiert, ist seine Sichtweise möglich. Sie entspricht einer bestimmten Wahl im Sinne der genannten Eichfreiheit, enthält aber keine neue Physik. Der Vergleich mit Beobachtungen ist daher gegenstandslos, da eine Eichung nicht falsifizierbar ist.

Seine Arbeit ist aber keinesfalls so gemeint. In der Rechtfertigung seiner Metrik benutzt er eine andere Definition der Eigenzeit (oder inhärenten Zeit) als in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Er stellt die Behauptung auf, daß diesem anderen Zeitmaßstab eine physikalische Entität zugrundeliegt. Die Existenz einer solchen Entität habe ich allerdings im Abschnitt über die Eichfreiheit bestritten. Aus den Ausführungen TROITSKIIS (1987, 390) geht hervor, daß er hierfür ein materielles Medium als Äther für die Lichtausbreitung in Betracht zieht. Leider wird nicht gesagt, wie dieses Medium beobachtet werden kann, um eine physikalische Definition eines zusätzlichen Maßstabes abzugeben und jene Eichfreiheit zu reduzieren oder aufzuheben. Daher ist seine Abgrenzung gegen die Standarddefinition der Eigenzeit und der Versuch, sein Modell empirisch abzusichern, zumindest irreführend.

Der Sachverhalt liegt bei B. SETTERFIELD (1983) sehr ähnlich. Er geht von einem jungen Universum mit abnehmender Lichtgeschwindigkeit und zunehmenden radioaktiven Halbwertszeiten aus. Sein Modell läßt sich unter Ausnutzung der Eichfreiheit durch eine zeitabhängige Umskalierung der Zeit aus dem Standardmodell gewinnen. Allerdings streitet er die physikalische Äquivalenz zum Standardmodell ab, indem er behauptet, daß eine Abnahme der Lichtgeschwindigkeit im Verlauf der letzten Jahrhunderte mit herkömmlichen Maßstäben und Uhren tatsächlich gemessen wurde.[13]

Am Beispiel einer mechanischen Uhr, die aus einem zwischen zwei ideal reflektierenden in konstantem Abstand befindlichen Wänden oszillierenden Teilchen T besteht, kann man sich klarmachen, daß unter den theoretischen Voraussetzungen SETTERFIELDS eine Abnahme der Lichtgeschwindigkeit nicht hätte gemessen werden können, da die Gruppengeschwindigkeit des Wellenpakets

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k} = \frac{c\,k}{\sqrt{k^2 + \left(\frac{m_T c}{\hbar}\right)^2}} \qquad (15)$$

(ω: Kreisfrequenz, k: Wellenzahl, m_T: Masse des Teilchens), mithin die Geschwindigkeit des Schwerpunktes des Teilchens und damit der Gang der *makroskopischen* Uhr proportional zu c abnimmt[14], genau wie ja auch der Gang der radiometrischen Uhren in SETTERFIELDS Bild.

Für jede mechanische, makroskopische Uhr läßt sich im Prinzip ein entsprechendes Argument finden. Tatsächlich war der Gang der Uhren der damaligen Zeit durch eine derartige mechanische, makroskopische Uhr geeicht, nämlich durch die Erddrehung: Eine Sekunde war definiert als der 86.400te Teil eines durchschnittlichen Sonnentages. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Gravitationswechselwirkung der Erde mit anderen Himmelskörpern die Rotationsgeschwindigkeit quantitativ nicht nennenswert beeinflußt. Die Erdrotation ist also keine „Gravitationsuhr".

In einer Tabelle der physikalischen Konstanten mit ihrer angenommenen Variabilität im Vergleich mit der Variabilität von c (Tab. 10 auf S. 39 a.a.O., 1983; auch in der Revision 1987!) gibt SETTERFIELD gemäß der bekannten Quellen selber zu, daß die Feinstrukturkonstante α eine echte Konstante sei. Damit bleibt die Abnahme der mit physikalischen Maßstäben und Uhren gemessenen Lichtgeschwindigkeit auch bei SETTERFIELD eine Unmöglichkeit, da (wie schon erwähnt) die Feinstrukturkonstante nichts anderes als das Verhältnis der „atomaren Geschwindigkeit" a/T zur Lichtgeschwindigkeit c ist und sich diese mithin nicht gegenüber makroskopischen Maßstäben und Uhren ändert.

Bewertung und Ausblick

Die angegebenen Schranken sind in dem Sinne empirisch, daß die zugrundeliegenden Beobachtungsdaten im Rahmen der etablierten Vorstellung vom Aufbau der Materie nicht anders gedeutet werden können.

Natürlich kann man diesen Rahmen, etwa am Beispiel von BAHCALL & SCHMIDT, in Frage stellen. Dabei darf man aber folgende Fakten nicht vergessen: *Bei der Annahme der Gültigkeit der genannten Theorien für die beobachteten Radiogalaxien handelt es sich nicht einfach um eine unerlaubte Extrapolation von Laborphysik in unerreichbare Entfernungen hinein.* Die beobachteten Spektren sind schon für sich allein genommen ein hinreichendes empirisches Zeugnis dafür, daß die moderne Physik eine exzellente Theorie für jene astronomischen Objek-

te ist. Man sollte sich klarmachen, daß etwa die Quantenmechanik in ihrer noch heute gültigen Form zu einer Zeit entwickelt wurde, als Atome ähnlich unerreichbar wie derart weit entfernte Beobachtungsobjekte waren und als man kaum mehr empirische Daten, die für die Quantentheorie relevant waren, von ihnen hatte, als heute von den Sternen: nämlich deren Spektren! Wir haben also darüberhinaus einen ausgezeichneten empirischen Test für die Gültigkeit der modernen Physik für heute beobachtbare astronomische Objekte. Wollte man diesem Test nicht trauen, so müßte man konsequenterweise den Labortests und mithin den Grundlagen der modernen Physik in gleichem Maße – und damit sämtlichen Ergebnissen der darauf aufbauenden Fakultäten – mißtrauen.

Bei der Annahme der Gültigkeit der genannten Theorien für die beobachteten Radiogalaxien handelt es sich nicht einfach um eine unerlaubte Extrapolation von Laborphysik in unerreichbare Entfernungen hinein.

Außerdem wurde schon in der Einleitung ausgeführt, daß solche empirischen Schranken insofern vom theoretischen Rahmen unabhängig sind, als sie in einer verbesserten bzw. allgemeineren Theorie (etwa einer „großen Vereinigung aller Wechselwirkungen") ein Pendant hätten.

Daher ist mit einer Änderung der Situation nicht zu rechnen. Die sehr geringfügigen empirisch verträglichen Variationen der fundamentalen Naturkonstanten eignen sich in keiner Weise, um das naturwissenschaftlich etablierte Weltalter mit der biblischen Überlieferung zu harmonisieren, und im Blick auf immer weitere Verfeinerungen der Schranken werden sie das in Zukunft noch weniger tun.

Es müssen andere Wege gefunden werden.

Anmerkungen

[1] Eine Variabilität der fundamentalen Konstanten bedeutet eine Modifikation der genannten Theorien.

[2] So liefert etwa die Vorstellung von der Zusammensetzung des elektromagnetischen Strahlungsfeldes aus Photonen (Lichtquanten) den Bezug des Wienschen Verschiebungsgesetzes zur Planck-Konstanten h.

[3] Hier ist durchweg die elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ gewählt; das ist in diesem Zugang am durchsichtigsten und entspricht übrigens der Wahl vieler Lehrbücher über Elektrodynamik. Im Gegensatz zu dieser Wahl ist die Konstante ε_0 ebenso wie die Ladungseinheit (die Ampèresekunde As) und auch die magnetische Feldkonstante μ_0 international über den „Umweg" der magnetischen Anziehung von stromdurchflossenen Leitern definiert und so implizit von der Lichtgeschwindigkeit abhängig. Daß das Verhältnis A^2s^2/ε_0 nicht mehr von der Lichtgeschwindigkeit abhängt, ist auf Anhieb nicht zu sehen. Hier ist es daher viel sinnvoller, die Definition der Ladung als Vielfaches der real in der Natur vorkommenden Elementarladung e vorzunehmen, so daß die Verwendung der elektrischen Feldkonstanten vollkommen überflüssig ist und auf obige Wahl hinausläuft. Außerdem führt die internationale Definition eine zusätzliche Einheit (ε_0 ist dort dimensionsbehaftet) und damit eine – wie wir sehen werden – unnötige weitere Eichfreiheit ein.

[4] Ich verwende hier die reduzierte Masse, damit die Gl. (3) und(4) exakt stimmen.

[5] Abgesehen von den anderen Teilchenmassen; aber ich setze ja ausdrücklich voraus, daß alle Massenverhältnisse ohnehin konstant sind.

[6] Nach früherer Definition – die heutige scheidet in diesem Stadium unserer Diskussion wegen Einbeziehung der Lichtgeschwindigkeit aus.

[7] Nicht-Aufspaltung der Niveaus nach der Drehimpulsquantenzahl j.

[8] Um genau zu sein, handelt es sich bei der elektroschwachen Wechselwirkung des Standardmodells um eine vereinigte Theorie der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung, die zwei fundamentale, dimensionslose Kopplungsstärken $\alpha_{SU(2)}$ und $\alpha_{U(1)}$ nach dem Muster der Elektrodynamik und der starken Wechselwirkung („Chromodynamik") hat. Die gruppentheoretischen Bezeichnungen $SU(2)$ und $U(1)$ entsprechen bestimmten, die elektroschwache Wechselwirkung definierenden Symmetrien, die aber zum Teil „versteckt" sind. Die Konsequenz ist, daß die Konstanten $\alpha_{SU(2)}$ und $\alpha_{U(1)}$ nicht unmittelbar experimentell zugänglich sind. An deren Stelle nimmt man die experimentell zugänglichen Konstanten α und G_F, die theoretisch Funktionen von $\alpha_{SU(2)}$, $\alpha_{U(1)}$ und bestimmten Teilchenmassen sind. Diese Teilchenmassen sind für die Dimensionsbehaftetheit von G_F verantwortlich. Die Dimensionsbehaftetheit von G ist dagegen grundsätzlicher Art.

[9] Ein solcher Übergang ist z.B. der Zerfall eines sog. „seltsamen" Teilchens in ein Teilchen, das nur aus Quarks derjenigen Familie aufgebaut ist, aus denen auch Protonen und Neutronen bestehen.

[10] „Besonders streng" nannten die Autoren ihre Überprüfung wegen der bei Radiogalaxien möglichen hohen Genauigkeit der Wellenlängenmessung einerseits und der Klarheit über die Ursache ihrer Rotverschiebung andererseits (dieselbe Ursache wie bei anderen Galaxien) im Gegensatz zu in diesem Zusammenhang bis dahin betrachteten quasistellaren Radioquellen.

[11] Die Konstanz von α für die Zeit dazwischen ergibt sich aus der Betrachtung von Spektren von Objekten, die nicht so weit entfernt sind.

[12] da sie erst für Teilchenenergien bzw. Temperaturen gelten, die für das hier betrachtete Problem keine Rolle spielen.

[13] Die statistische Signifikanz dieser Feststellung ist zumindest fraglich.

[14] Die Compton-Wellenlänge h/m_Tc ist bei SETTERFIELD wie überhaupt jede Länge zeitlich konstant, so daß auch für nichtrelativistische Geschwindigkeiten $v \ll c$ bzw. kleine k die Proportionalität zu c gilt.

Dank: Prof. Dr. Peter C. HÄGELE, Dr. Frank MERTINS, Peter SCHULLER und Matthias STEHLE danke ich für wertvolle Hinweise.

Literatur

BAHCALL JN, SCHMIDT M (1967) Does the fine-structure constant vary with cosmic time? Phys. Rev. Lett. *19*, 1294f.

DYSON FJ (1967) Time variation of the charge of the proton. Phys. Rev. Lett. *19*, 1291-1293.

DYSON FJ (1972) Aspects of Quantum Theory. Cambridge U.P.

GAMOW G (1967) Electricity, gravity, and cosmology. Phys. Rev. Lett. *19*, 759.

ITZYKSON C, ZUBER J-B (1980) Quantum Field Theory. McGraw-Hill, New York.

JORDAN P (1971) The Expanding Earth, International Series of Monographs in Natural Philosophy *37*, Chapter1. Pergamon Press.

MELNIKOV VN (1993) Fundamental Physical Constants and Their Stability. Preprint #CBPF-NF-047/93, ISSN 0029-3865, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro.

MISNER CW, THORNE KS, WHEELER JA (1970) Gravitation. Freeman and Company, San Francisco.

SETTERFIELD B (1983, revidiert 1987) The Velocity of Light and the Age of the Universe. Creation Science Association (Inc.), Adelaide.

TROITSKII VS (1987) Physical constants and the evolution of the universe. Astroph. Sp. Sci. *139*, 389-411.

KURZBEITRÄGE

WELTRAUMTELEGRAMM

von Norbert Pailer

Quasare geben neue Rätsel auf
Energiemonster am Rande der Welt

Eigentlich hat man noch nie so richtig gewußt, mit welchen Objekten man es bei den Quasaren zu tun hat. Seit ihrer Entdeckung im Jahre 1960 haben sie die Astronomen genarrt. Ein Hauptarbeitsgebiet der optischen Astronomie war damals, im Optischen sichtbare Objekte auszumachen, die zu den radioastronomischen Signalen gehören. Damit sollte die wahre Natur der Radioemission aufgedeckt werden. Mit dieser Aufgabe schlagen sich nun die Astronomen noch 35 Jahre später herum.

Abb. 1: Der Quasar PKS 2349 (Pfeil), vom Hubble-Space-Telescope aufgenommen. (ESO) Es handelt sich um den kleinen Punkt oberhalb des großen Flecks unterhalb der Bildmitte.

Hubble-Beobachtungen. Glücklicherweise haben sie heute ein Instrumentarium zur Hand, das ihnen ungeahnte Möglichkeiten eröffnen sollte. So setzt man große Hoffnungen auf das durch die Reparatur im Weltraum auf Höchstleistungen getrimmte Hubble Space Telescope. Auf der Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft in Tucson hat John BAHCALL vom Institute of Advanced Study in Princeton über erste Beobachtungen an den 14 hellsten – und daher vermutlich relativ nahen – Quasaren berichtet. Diese Messungen scheinen die bisherigen Modellvorstellungen der Quasare, von deren Aufbau und Energieerzeugung auf den Kopf zu stellen. Dies dürfte eine neue Diskussion über diese rätselhaften Objekte auslösen. Abb.1 zeigt ein vom Hubble-Space Telescope aufgenommenes Objekt vom Rande der Welt: den Quasar PKS 2349.

Die gewaltigen Energiemonster von Quasaren haben die Astrophysiker von Anfang an verwirrt. In den Anfängen waren es australische und englische Radioastronomen, die mit den damals noch recht bescheidenen Radioantennen auffällige Strahlungsquellen gefunden haben. Das Erstaunliche daran war, daß am vertrauten Sternenhimmel keine optischen Gegenstücke auszumachen waren. Erst mit dem 5m-Spiegel der Mount-Palomar-Sternwarte fand man winzige, sternähnliche Licht-

fleckchen, die aber ganz und gar nicht zu den hellen Radioquellen passen wollten.

Dieses sehr gegensätzliche Erscheinungsbild war denn auch der tiefere Grund, daß man sie „Quasar" nannte, was für „quasistellare Radioquelle" steht. Nun ging man daran, über die Aufnahme ihrer Spektren etwas mehr über die Natur dieser ausgefallenen Strahler zu erfahren. Man erhielt eine Antwort, die zunächst unverständlich blieb: Die Linien der Spektren ließen sich nicht mit den bekannten chemischen Elementen in Verbindung bringen. Erst Jahre danach konnten die wenigen überhaupt erkennbaren Linien dem Muster von Wasserstoff zugeordnet werden, wenn man eine extreme Rotverschiebung zuließ. Dies ist nach der Urknallvorstellung identisch mit einer riesigen Entfernung: Quasare müssen Milliarden von Lichtjahren und mehr entfernt sein.

Spektren. Am stärksten ist die Lyα-Linie ausgeprägt („Ly" steht für „Lyman"). Sie wird von Wasserstoffatomen hervorgerufen, deren Elektronen aus dem ersten angeregten Zustand in den Grundzustand zurückfallen und dabei die Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen in Form von Photonen abgeben, die eine ganz bestimmte Wellenlänge haben, nämlich $\lambda_0 = 1215$ Å. Dies ist die „Laborwellenlänge", die im Ruhesystem der Wasserstoffatome gemessen wird. Im Spektrum des Quasars erscheint die Linie jedoch bei etwa $\lambda_{em} = 4630$ Å. Dies entspricht einer Rotverschiebung der Emissionslinie z_{em}

$$z_{em} = \frac{\lambda_{em} - \lambda_o}{\lambda_o} = 2{,}81.$$

Aus anderen Linien, wie dem dreifach ionisierten Kohlenstoff C^{3+} – das entspricht dem Peak CIV 1549 – ergibt sich ebenfalls obiger Wert für die Rotverschiebung.

Nach den Modellvorstellungen der Urknalltheorie wird daraus eine Fluchtgeschwindigkeit für den Quasar abgeleitet:

$$v_{Quasar} = \frac{(1 + z_{em})^2 - 1}{(1 + z_{em})^2 + 1 \cdot c},$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Mit $z_{em} = 2{,}81$ ergibt sich eine Fluchtgeschwindigkeit $v_{Quasar} = 0{,}871c = 261.000$ km/sec (Borgeest 1995).

Aus der großen Anzahl scharfer Absorptionslinien bei höheren Massen in Quasarspektren, die auf dem Weg des Lichts durch das intergalaktische Medium entstanden, ergibt sich die Frage, woher diese Elemente kommen. Bei einem Urknall können sie nicht entstanden sein, da dort im Wesentlichen Wasserstoff und Helium synthetisiert wurden.

Im intergalaktischen Raum ist aber etwa jedes millionste Atom ionisierter Kohlenstoff. Da wegen der viel zu geringen Dichte intergalaktischer Wolken aus ihnen keine Sterne entstanden sein können, ist die logische Folgerung, daß es vor der Entstehung der heutigen Galaxien schon eine Generation von Sternen gegeben haben sollte. Diese ist möglicherweise als Supernovae explodiert und hat so den Kohlenstoff hinterlassen – ein möglicher Erklärungsversuch, der aber eine Reihe anderer Probleme aufwirft.

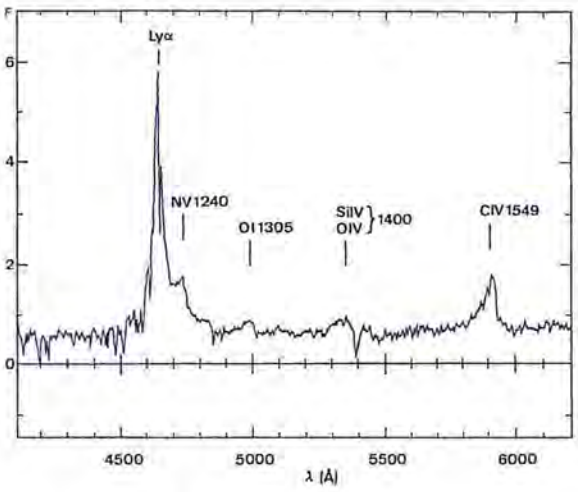


Abb. 2: Spektrum eines Quasars. Man erkennt deutlich einige breite Emissionslinien verschiedener Intensität. Es ist ausgewiesen, welchen atomaren Übergängen die Linien zuzuordnen sind. (nach Borgeest 1995)

Doppelquasare. Das Lexikon der Astronomie (Moore 1990, 158) schildert die Schwierigkeit, Doppelquasare zu verstehen: „Durch eingehende Beobachtungen einiger Quasare im Radiobereich konnten zwei oder mehr Komponenten gefunden werden, die sich voneinander entfernten. Wenn Quasare tatsächlich diese großen, aus der Rotverschiebung abgeleiteten Entfernungen haben, so scheinen sich diese Komponenten mit mehrfacher Lichtgeschwindigkeit voneinander wegzubewegen – in offensichtlichem Widerspruch zur Einsteinschen Relativitätstheorie. Dieser Effekt wird überlichtschnelle Bewegung genannt. Zusammen mit der außergewöhnlichen Leuchtkraft hat dies einige Astronomen dazu veranlaßt, an den aus Rotverschiebungen abgeleiteten Entfernungen zu zweifeln." Erst in jüngster Zeit hilft man sich mit der Vorstellung, daß die scheinbar überschnelle Bewegung auf einem relativistischen geometrischen Effekt beruht.

Rasante Helligkeitsveränderung. Mit der Entdeckung der riesigen Entfernungen war natürlich noch gar nichts geklärt, vielmehr wurde ein weiteres Rätselraten ausgelöst: Was sich wie ein schwach leuchtendes Sternchen darstellte, mußte tatsächlich heller leuchten als Tausende von Galaxien und mußte viel weiter von uns entfernt sein, als alle uns bis dahin bekannten Sternsysteme. Eine zusätzliche Erschwernis brachten Quasare ein, indem manche innerhalb weniger Tage ihre Helligkeit signifikant verändern. Eine solche rasante Änderung ist nur möglich, wenn die Objekte klein sind. Sonst ist eine fast gleichzeitige Zu- und Abnahme der Helligkeit kaum denkbar. Wenn also ein Quasar innerhalb eines Tages seine Helligkeit

ändert, muß sein Radius kleiner sein als die Strecke, die das Licht an einem Tag zurücklegt. Das entspricht einem Lichttag oder umgerechnet 170 Astronomischen Einheiten. Das ist wahrhaft winzig im Vergleich zu einer Galaxie, die typischerweise einen Durchmesser von 100.000 Lichtjahren hat. Welcher physikalische Prozeß ist in der Lage, auf derart kleinem Raum von typischerweise Lichttagen bis -wochen soviel Energie freizusetzen?

Durch die Information einer großen Rotverschiebung hat man, wie bereits diskutiert, für die Quasare gewaltige Entfernungen abgeleitet. Damit muß es sich um Objekte handeln, die wir nach der Urknallvorstellung in einem frühen Entwicklungsstadium des Universums sehen. Nun hat man mit hochempfindlichen Detektoren um den Kern einiger Quasare eine Art Halo ausgemacht, die zu der Vorstellung Anlaß gab, daß wir mit Quasaren die Kerne von noch sehr jungen Galaxien vor uns haben.

Theorie der Quasare. Die zur Zeit am meisten favorisierte Theorie zur Klärung der Leuchtkraft von Quasaren postuliert im Zentrum dieser Objekte ein massives Schwarzes Loch, das von einer „Gastgeber"-Galaxie umgeben ist. Natürlich hat noch nie ein Teleskop ein Schwarzes Loch gesehen. Es ist, als ob man im Kohlenkeller eine schwarze Katze finden wollte. Nachweisen kann man es nur indirekt (PAILER 1994a) aufgrund seiner Wirkung auf seine Umgebung, denn seine geballte Anziehungskraft erfaßt alles, was zu nahe kommt und verschlingt es. Der Sog dieser kosmischen Kannibalen ist so groß, daß sogar Licht verschlungen wird. Daher der Name.

„Nun sitzt also ein Schwarzes Loch im Innern dieser „Gastgeber"-Galaxie, stets darauf bedacht, Materie aus der Umgebung an sich zu reißen. Diese Materie stürzt nicht direkt auf das Schwarze Loch zu, sondern sammelt sich zunächst in einer sogenannten Akkretionsscheibe – einer Art Materiestrudel. In diesem turbulenten, brodelnden Durcheinander wird schließlich soviel Energie freigesetzt, daß große Mengen elektrisch geladener Teilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit davonströmen und zugleich extreme Lichtmengen ausschütten können." (HAHN 1995, 88).

Diese Modellvorstellung stand bisher nicht im Widerspruch zu Beobachtungen, waren doch die Gastgebergalaxien mit erdgebundenen Teleskopen wegen atmosphärischer Störungen ohnehin nicht zu beobachten. Jedoch sollte das Hubble Space Telescope in der Lage sein, diese auszumachen. Bislang konnten sie jedoch nicht beabachtet werden, so daß eine Bestätigung des mühsam erstellten Quasar-Modells selbst mit dem größten, von atmosphärischen Störungen freien Teleskop nicht erreicht wurde.

Wenn die Quasare also nicht in eine Gastgeber-Galaxie eingebunden, sondern „nackt" sind, bleibt die Frage, wie die Schwarzen Löcher ihren gewaltigen Materiebedarf zur Energieproduktion decken. „Sie müßten jeweils bis zu zehn Sonnenmassen pro Jahr verschlingen, um sich über Milliarden von Lichtjahren hinweg bemerkbar machen zu können." (HAHN 1995).

Sicher hat man einige Erklärungsversuche parat, die aber nicht weit greifen:

1. Die „nackten" Quasare könnten gerade so alt sein, daß sie das Material ihrer Gastgeber-Galaxie aufgezehrt haben; d. h. von einer einstigen Gastgeber-Galaxie wäre gerade nichts mehr zu erkennen.
➜ Es klingt allerdings etwas unwahrscheinlich, daß sich mehr als die Hälfte der Quasare gerade in dieser letzten Phase ihrer Aktivität befinden sollten.
2. Die „nackten" Quasare sind von „Dunkler Materie" umgeben, von der sie weiterhin ihren Energiebedarf decken können.
➜ Die Existenz „Dunkler Materie" wird von vielen Astronomen für die Erklärung unterschiedlichster Phänomene für notwendig erachtet (vgl. PAILER 1994 a).

Sicher scheint zu sein, daß der Weiterführung von Beobachtungen vor der Fortführung von Spekulationen der Vorzug gegeben werden muß. Auf Überraschungen muß man sich jedenfalls gefaßt machen.

(Dem Bericht liegt ein Aufsatz aus „New Scientist" vom 21. 1. 95 zugrunde.)

Wassereis auf Merkur

„Radarastronomen haben auf dem schattigen Boden etlicher Krater an den Polen des sonnennächsten Planeten Eis aufgespürt. Seine Herkunft ist rätselhaft" (VAAS 1994).

Diese Entdeckung ist um so erstaunlicher, als auf Merkur Temperaturen bis zu 470° C herrschen, eine Temperatur, bei der Metalle wie Zinn und Blei schmelzen. Außerdem existiert nur eine hauchdünne Atmosphäre, die zudem keinen Wasserdampf enthält. Kein Wunder also, daß das Wassereis als sensationelle Entdeckung angesehen wird. Sie wurde mit der talfüllenden Radarschüssel von Arecibo gemacht. Hinweise auf eigenartige Reflexe in der Polregion des Merkur wurden schon früher gemacht (BÜHRKE 1993). Man hat sie mit Messungen an Marseis und den teilweise eisigen Monden des Jupiter verglichen, konnte aber junge Lavafelder als Ursache nicht ausschließen. Der durchschlagende Beweis war erst mit der Steigerung der Genauigkeit möglich, die eine Auflösung von nunmehr 15 km erreichte. Dabei fand man rund 30 ungewöhnlich starke, depolarisierte Radarechos um Merkurs Nord- und Südpol jeweils bis zum 80. Breitengrad. Der ausgedehnteste Reflex stammte von einer Region am Südpol mit 125 km Durchmesser. Er war schon 1991 mit dem Krater *Chao Meng-Fu* in Verbindung

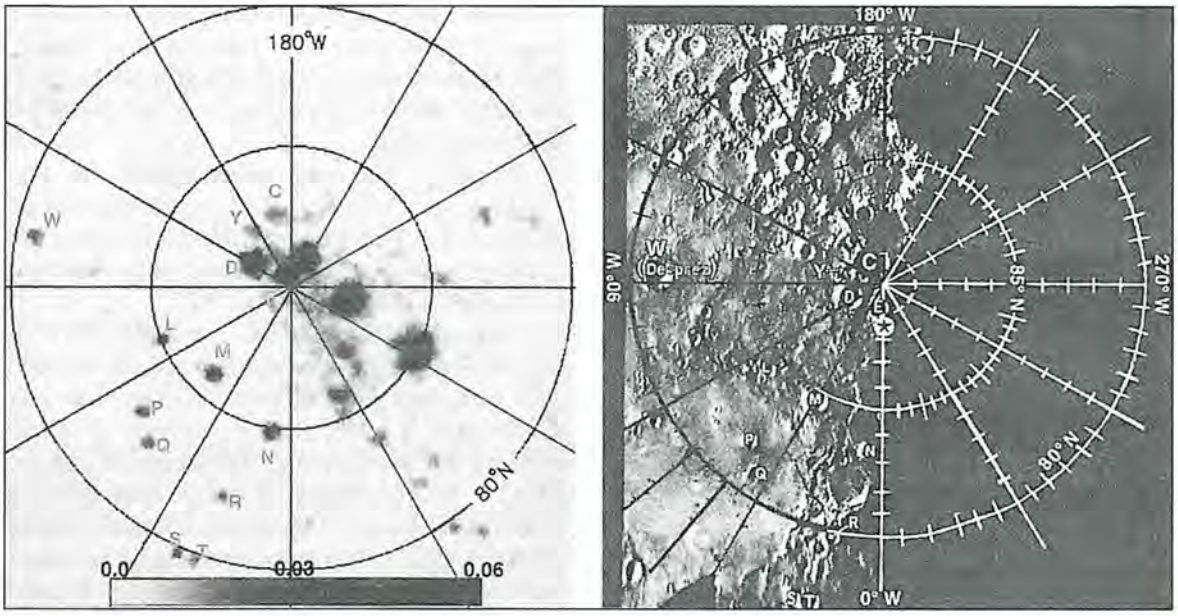


Abb. 3: Links: Radarbild vom Nordpol des Merkur. Es sind mehrere starke Reflexe zu sehen, wie sie von Wassereis hervorgerufen werden. Rechts eine von der Raumsonde Mariner 10 *aufgenommene Karte von derselben Region, die an den entsprechenden Stellen Krater gleicher Größe ausweist. Wegen des Schattens lassen sich nicht alle Radarechos Kratern zuordnen. Abdruck mit Erlaubnis von Nature 369, 213ff. © 1994 Macmillan Magazines Limited*

gebracht worden. Die anderen hatten Durchmesser von bis zu 60 km und waren ebenfalls kreisrund. Erst jetzt konnte man wegen der hohen Auflösung den Großteil der Echos mit großer Sicherheit Geländeformationen auf dem Merkur zuordnen. (In die Krater konnte nur deshalb von der Erde aus hineingespäht werden, weil die Merkurbahn zur Erdbahn um 7° geneigt ist.)

In den Jahren 1974/75 hatte sich die amerikanische Raumsonde Mariner 10 bei drei Vorbeiflügen dem Planeten bis auf 694 km genähert. Ihre rund 2.700 Photos zeigen eine kraternarbige Oberfläche wie die unseres Erdmondes. Allerdings hatte die Sonde, bedingt durch ihre Flugbahn, nur etwa 50% der Merkuroberfläche fotographieren können. Gerade in Polnähe waren weite Bereiche des Planeten im Schatten gelegen. Immerhin ließen sich die Positionen von gut der Hälfte der Radioechos Kratern zuordnen. In Abb. 1 werden Ergebnisse der Radarmessungen einer Aufnahme der Oberfläche durch die Mariner-Raumsonde gegenübergestellt.

Weil die Rotationsachse des Merkur nahezu senkrecht zu seiner Bahnebene verläuft, steht die Sonne an den Polen immer in Horizontnähe. Somit herrscht im Innern größerer, polnaher Krater ewige Finsternis, und das Eis ist vor der Strahlungswärme geschützt. Nach thermischen Modellrechnungen sollten die Temperaturen an den Polen zwar auch bei glatter Oberfläche ungemütliche –100°C betragen. Da wegen des extrem niedrigen Atmosphärendrucks Wasser selbst bei dieser Temperatur sieden würde, sollte sich vorhandenes Wassereis aber dennoch rasch verflüchtigen, was die Angelegenheit noch rätselhafter macht.

Woher das Eis stammen könnte, ist noch weitgehend unklar. Es ist damit auch ungeklärt, ob das Eis ein Relikt aus der Frühzeit des Planeten oder ob es jüngeren Datums ist. Man diskutiert Wasserdampf aus früherer „Vulkantätigkeit" (Ausgasen), das Ausfrieren einer früheren Atmosphäre in Form von ewigem Eis oder daß Meteoriten, Planetoiden oder – was wahrscheinlicher ist – Kometen auf die Planetenoberfläche gestürzt sind. Da letztere als „schmutzige Schneebälle" verstanden werden, könnten sie als Quelle gelten.

Chiron – ein Objekt narrt die Fachwelt

Bereits 1977 wurde Chiron als schwaches Nebelfleckchen auf einer fotografischen Platte des Mt. Palomar-Observatoriums ausgemacht. Es bekam die routinemäßige Bezeichnung „1977 UB" und wurde letztlich als Asteroid „2060 Chiron" bezeichnet. Da aber Asteroiden üblicherweise zwischen Mars und Jupiter zu Hause sind, waren manche Astrophysiker unzufrieden. Denn das neuentdeckte Objekt bewegt sich zwischen Uranus und Saturn. Aber mit seinen 200 bis 350 km Größe war es auch kein typischer Komet. Chiron schien nicht in die bisherige Kategorie zu passen: Für einen Planeten war er zu klein, für einen Asteroiden zu weit entfernt und für einen Kometen zu groß. Nun, man hat sich damit zufrieden gegeben, daß man mit Chiron eben einen „schrägen Vogel" von Objekt getroffen hat, der sich nun mal nicht so einfach kategorisieren läßt.

Während weiterer Beobachtungen über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren hat man unter anderem

einen regelmäßigen Wechsel der Helligkeit von 9% entdeckt. 1988 wurde ein plötzlicher Anstieg der Helligkeit um den Faktor 2 beobachtet. Was mag in dieser kalten 13 AE (1 AE = Abstand Sonne – Erde) Entfernung Chiron passiert sein? (STERN 1994) Hat Chiron eine Koma (Atmosphäre) entwickelt? Wurde er von einem streunenden Objekt getroffen? Ist eine Art Geysir ausgebrochen?

Oft können Astronomen die Beobachtungen nicht erklären. Aber sie können Dinge als unwahrscheinlich ausschließen. Als Ergebnis fiel ein gewisser Verdacht auf Sublimationsvorgänge auf Chiron, die zur Ausbildung einer Koma führen könnten. Sublimation von Wassereis konnte schnell ausgeschlossen werden. Dafür ist er in einer zu kalten Region des Planetensystems. Deshalb bräuchte man etwas Leichtflüchtigeres, wie CO_2-, Methan- oder Stickstoffeis. Zum andern ist klar: Wenn Chiron auch nur einen Bruchteil seines Lebens im Innern des Planetensystems zugebracht hätte, wäre dabei soviel Eis verlorengegangen, daß er heute nicht mehr aktiv sein könnte. Deshalb liegt es sehr nahe, daß Chiron von weiter außen kommen sollte. 1989 hat man dann tatsächlich eine Koma von Eis und Staub mit einer Ausdehnung von 320.000 km ausfindig gemacht.

Aus heutiger Sicht haben wir ein Objekt aus dem postulierten Kuiper-Gürtel (Bereich außerhalb der bekannten Planeten, der neben der noch weit entfernteren Hills- und Oortschen Wolke als Kometenreservoir dienen soll) vor uns. Das wird dadurch nahegelegt, daß in den Folgejahren regelmäßig im Abstand von 35 bis 45 AE immer wieder 200 bis 400 km große Objekte entdeckt wurden (PAILER 1994b).

Damit bekommt unser Planetensystem eine dritte Komponente: Neben inneren und äußeren Planeten und dem Asteroidengürtel gibt es im Planetensystem Objekte, die man als ausgerissene Mitglieder des postulierten Kuiper-Gürtels versteht. Wir wissen nichts über die Dichte und Weite des Gürtels. Wir wissen nichts über mögliche Lücken im Gürtel oder ob er kontinuierlich ist, was die typische Größe der Objekte ist, woraus sie gemacht sind.

Diese Entdeckungen von Objekten, die dem Kuiper-Gürtel zugeordnet werden, werden mit der Gas/Staub-Scheibe um ß-Pictoris in Verbindung gebracht, die man vor Jahren mit dem Satelliten IRAS entdeckt hat.

Möglicherweise ist die Analogie mit dem Asteroidengürtel im Jahre 1807 angebracht, als man gerade Ceres, Juno, Pallas und Vesta entdeckte. Ein ganz neues Kapitel der Entdeckungen im Planetensystem ist eröffnet.

Die Geschichte von Chiron zeigt auch, wie über die letzten zwei Dekaden das Leben der Astrophysiker zunehmend schwieriger wurde. Viele klar umgrenzten Begriffe sind inzwischen verwischt worden. Wir wissen heute, daß Kometen „ausgeschaltet" werden können, so daß sie dann sehr den Asteroiden ähneln. Gleichzeitig können typische Asteroiden auch aktiv werden und so kometenhaften Charakter zeigen. Kometen können von Planeten eingefangen und von deren Gravitationskräften zerbrochen werden und so zum Aufbau von haarfeinen planetaren Ringen dienen. Die Begriffe sind leider nicht mehr so scharf voneinander abzugrenzen, wie man es sich gerne wünschen würde.

Literatur

BORGEEST U (1995) Quasar-Absorptionslinien. Sterne und Weltraum 6/95, S. 445-451.

BÜHRKE T (1993) Eis auf dem Merkur. Sterne und Weltraum, 2/1993.

HAHN HM (1995) Nackte Quasare. Bild der Wissenschaft 4/1995, S. 88-89.

HECHT J (1995) Lonely quasars send astronomers back to basics. New Scientist Jan 21, 1995, p. 16.

MOORE P (Hg, 1990) Lexikon der Astronomie. Freiburg.

PAILER N (1994a) Geheimnisvolles Weltall.Neuhausen.

PAILER N (1994b) Eiskörperpopulation jenseits der Planeten? In: Neues aus der Planetenforschung, 2. Auflage, Neuhausen 1994.

STERN A (1994) Chiron. Interloper from the Kuiper Disk? Astronomy 08/1994.

VAAS R (1994) Wassereis auf dem Merkur. Spektrum der Wissenschaft, 8/1994

Neues aus der „Dinowelt"

von Siegfried Scherer und Harald Binder

Dinosaurier-Ei mit Embryo

In der oberen Kreide der Wüste Gobi wurde eine reichhaltige Fossillagerstätte entdeckt, welche über 300 Skelette von Säugetieren und Reptilien enthält, dazu zahlreiche Dinoauriereier. Die Eier sind häufig in Form von Nestern angeordnet, einige davon zeigen Verwitterungserscheinungen. Eines der Eier enthielt das Skelett eines kurz vor dem Schlüpfen stehenden Embryos, im gleichen Nest fand man noch zwei Schädel von ähnlicher Größe, welche wahrscheinlich aus anderen Eiern stammen (NORELL et al 1994). Den Embryo konnte man der Gruppe der Oviraptoriden zuordnen, die Eierschalenstruktur zeigt Ähnlichkeiten zu ratiten Vögeln, einer heutigen Gruppe von bodenlebenden Vögeln, die im Erscheinungsbild dem Strauß gleichen. Ob die Ähnlichkeit der Eierschalenstruktur allerdings ein gewichtiges Indiz für eine phylogenetische Verwandtschaft ist, kann kontrovers dis-

Stud. Int. J. 2 (1995), 84 – 86

kutiert werden.

Schon 1923 hat OLSON in der Wüste Gobi ein Nest von Dinosauriereiern entdeckt, welches er aber der pflanzenfressenden Gattung *Proceratops* zuordnete, weil diese Gattung in den entsprechenden Schichten überwiegend gefunden wird. Auf dem von OLSON entdeckten Nest wurden die Überreste eines erwachsenen *Oviraptor* ergraben, welcher dieser Tatsache seinen Namen verdankt: „Oviraptor" könnte man etwa mit „Eier-Räuber" übersetzen. Der neue Fund führt NORELL und Mitarbeiter zu einer neuen Interpretation: Der 1923 gefundene *Oviraptor* war wohl nicht beim Eierraub, sondern beim Bewachen oder sogar bei der Bebrütung seiner Eier von dem todbringenden Ereignis überrascht worden, welches zu Bildung der Fossillagerstätte führte. NOVACEK et al. (1995) schreiben: „Manche Fossilen (der Wüste Gobi, d.Verf.) sehen so aus, als stammten sie von frisch verwesten Kadavern... Außerdem schienen die Tierleichen sogleich eingebettet worden zu sein, noch bevor Aasfresser sich darüber hermachten oder die Witterung ihnen zusetzten konnte. ...Die kreidezeitlichen Sandsteinschichten sind so wenig nach Korngrößen sortiert, daß sie bei heftigen Stürmen entstanden sein dürften. ...Manche Tiere (von Fundstellen der inneren Mongolei, d.Verf.) der wurden vielleicht sogar lebendig begraben."

Die wiederholten Funde von Nestern und möglicherweise von brütenden Eltern von Sauriern lassen überdies an Deutungen der Erdgeschichte zweifeln, welche die Ablagerung aller paläozoischen und mesozoischen geologischen Systeme in den Rahmen eines einzigen Katastrophenjahres stellen. Die Eiablage erfordert vorhergehende Zeit zur Festigung von Sedimenten, zur Stabilisierung von Lebensräumen und zur Entwicklung von Populationen. Dazu kommt die Zeit der Eireifung vom Zeitpunkt der Eiablage bis zum Schlüpfen.

DNA aus fossilen Dinosaurierknochen?

Untersuchungen von 'alter DNA', d.h. genetische Information tragender Moleküle von Organismen, welche schon seit langer Zeit nicht mehr leben, üben auf viele Menschen eine große Faszination aus. Das hängt unter anderem damit zusammen, daß, wenn die bisherigen Ergebnisse bestätigt werden können, erstmals historische Informationen direkt für experimentelle naturwissenschaftliche Untersuchungen zugänglich werden. Sollte solch 'alte DNA' aus Dinosauriern stammen, so ist dem Entdecker öffentliche Aufmerksamkeit sicher.

S.R. WOODWARD und seine Mitarbeiter (1994) haben Knochenfragmente, welche von einer Matrix aus Sandstein umgeben waren, aus einem Kohleflöz

Abb. 1: Oviraptor-*Embryo (Aus Science 266 [1994], Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Science)*

geborgen, das der Blackhawk Formation aus der Mesaverde Gruppe (Obere Kreide) zugeordnet wird. Aus dieser Formation sind bisher mindestens 14 verschiedene Dinosaurierarten beschrieben. Das Flöz hat eine Mächtigkeit von 1,2 bis 8,2 m. Die Fragmente wurden aus einer Tiefe von 610 m, etwa 30 cm unter der Oberfläche der kohleführenden Schicht geborgen. In der Umgebung wurden auch verkohlte Pflanzenteile sowie Dinosaurierspuren gefunden. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Knochen ergaben keine Hinweise auf eine Mineralisierung (Austausch von organischem Material durch Mineralien). Aus dem Innenbereich der Knochen wurden 15 Proben hergestellt und daraus die DNA extrahiert.

Mit zwei Primern (Primer sind relativ kurze einsträngige DNA-Startermoleküle für die Polymerase-Kettenreaktion, PCR), mit einer Länge von 20 Basenpaaren (20 bp), welche in ihrer Sequenz einem Fragment der mitochondrialen DNA für Cytochrom b des Menschen entsprechen, konnten durch Vervielfältigung mittels PCR 9 Fragmente mit einer Länge von mindestens 134 bp gewonnen werden, die allerdings verschiedene Sequenzen aufwiesen. Die gefundenen Sequenzen unterscheiden sich von allen bisher bekannten Sequenzen für Cytochrom b. Die Fragmente erwiesen sich jedoch als zu kurz für phylogenetische Studien.

Der Artikel von WOODWARD et al. hat eine Diskussion ausgelöst, die u. a. in einigen 'Technical Comments' ihren Niederschlag fanden. Dabei wird in allen Diskussionsbeiträgen aufgrund von phylogenetischen Studien argumentiert, daß die von WOODWARD et al. beschriebenen Sequenzen der DNA-Fragmente, nicht, wie aufgrund von morphologischer Vergleiche und evolutionstheoretischer Überlegungen zu erwarten, die größte Übereinstimmung mit Cytochrom b von Vögeln zeigt. Unter Anwendung verschiedener Rechenverfahren ergab sich jeweils die größte Übereinstimmung mit aus Datenbanken entnommenen Säugetier-Sequenzen. Für HEDGES & SCHWEITZER (1995), ALLARD et al. (1995) und ZISCHLER et al. (1995) ist aufgrund der auffallenden Übereinstimmung mit Sequenzvarianten von menschlichem Cytochrom b eine Kontamination mit humaner DNA naheliegend. HENIKOFF (1995) fand eine maximale Übereinstimmung mit Walarti-

gen und Huftieren. In seiner Erwiderung stellt WOODWARD (1995) jedoch klar: „Wir sollten nicht die Möglichkeit einer vor langer Zeit entstandenen DNA-Sequenz ausschließen auf der Basis von hypothetischen Verwandtschaftsbeziehungen, deren evolutionäre Geschichte bisher nicht bewiesen ist."

Trotzdem scheint beim gegenwärtigen Stand der Diskussion eine Kontamination, aus welcher Quelle sie auch immer herrühren möge, die wahrscheinlichste Erklärung für die Befunde von WOODWARD et al. zu sein. Dies gilt so lange, bis die von ihnen publizierten Ergebnisse mit aussagekräftigeren Daten reproduziert worden sind.

Die größten Dinosaurier

Der Paläontologe Rodolfo CORIA arbeitet in einem kleinen Museum in Nord-Patagonien mit Fossilien des vielleicht größten bisher bekannten Dinosauriers: *Argentinosaurus* (APPENZELLER 1994). Ein Wirbel dieses Pflanzenfressers ist rund 150 cm groß, und ein Unterschenkelknochen mißt rund zwei Meter. Die Höhe des Tieres wird auf 7 m geschätzt, seine Länge auf 30 m und sein Gewicht auf 80-100 Tonnen. Der bis dahin größte Dinosaurier war *Seismosaurus* aus New Mexiko, sein Gewicht wird mit 40-80 Tonnen angegeben. Nun sind Gewichtsabschätzungen von ausgestorbenen Lebewesen immer unsicher, und es verwundert nicht, daß die Ehre, den größten bekannten Saurier entdeckt zu haben, nicht unbestritten bleibt. Daneben werfen Tiere dieser Größe aber auch grundsätzliche Fragen auf: Können sie bei dieser Größe überhaupt Warmblüter gewesen sein? Bei der notwendigen Menge von Nahrung könnte die Umwelt nur eine sehr kleine Population tragen. Ob eine sehr kleine Population aber über sehr lange Zeiten hinweg stabil sein kann, ist fraglich, weil kleine Populationen erfahrungsgemäß durch Zufallsereignisse relativ leicht ausgelöscht werden. Auch physiologische Probleme des Wärmehaushaltes oder der Pumpleistung des Blutkreislaufes sind bei solch großen Tieren ungelöst.

Warmblütiger Tyrannosaurus rex?

Endotherme Lebewesen (Warmblüter, Säugetiere und Vögel) sind in der Lage, ihre Körpertemperatur durch Veratmung von Kohlenhydraten oder Fetten konstant zu halten. Im Gegensatz dazu stehen ektotherme Lebewesen (Kaltblüter, wie etwa Fische und Reptilien). Ihre Körpertemperatur ist durch die Umgebungstemperatur festgelegt. Das hat zu Folge, daß eine Kreuzotter bei niedrigen Temperaturen nicht sehr gefährlich ist, weil sie sich – wenn überhaupt – nur sehr träge bewegen kann.

Früher hatte man ganz selbstverständlich angenommen, daß Dinosaurier als Reptilien Kaltblüter sind, doch sind daran Zweifel geäußert worden. Ein Argument stützt sich auf die Tatsache, daß selbst Eier von den größten Dinosauriern nicht länger als 25 cm sind. Dies ist vermutlich die Obergrenze, weil sonst die Schale aus Stabilitätsgründen so dick sein muß, daß das Baby sich nicht aus dem Ei befreien kann. Ein derart kleines Ei verlangt aber nach einer außerordentlich hohen Wachstumsrate des Babys, wenn in einer angemessenen Zeit die Größe des erwachsenen Tieres erreicht werden soll. Dies impliziert einen hochaktiven Metabolismus, was durch Warmblütigkeit gewährleistet ist (CARPENTER et al. 1994). Warmblütigkeit oder Kaltblütigkeit lassen sich auch aus den mikroskopisch sichtbaren Wachstumsstrukturen („Jahresringe") von Knochen ableiten, doch ergab die entsprechende Untersuchung von Saurierknochen kein eindeutige Antwort (CHINSAMY & DODSON 1995).

Die Debatte flammte erneut auf, als BARRICK & SHOWERS (1994) behaupteten, durch Messungen der Sauerstoffisotopenzusammensetzung von unterschiedlichen *Tyrannosaurus*-Knochen eindeutig die Warmblütigkeit dieses Großraubtieres belegen zu können. Die Sauerstoffisotopenzusammensetzung ist unter anderem von der Körpertemperatur abhängig. Bei einem Warmblüter ist die Temperatur aller Knochen mehr oder weniger identisch; deshalb ist auch die Sauerstoffisotopenzusammensetzung nicht von der Lage der Knochen abhängig – Fingerknochen des Menschen haben die gleichen Werte wie etwa Rippen. Dagegen hat ein Kaltblüter je nach Lage unterschiedliche Knochentemperaturen und damit auch unterschiedliche Isotopenwerte. Die Messungen von BARRICK & SHOWERS (1994) lieferten sehr ähnliche Werte für alle untersuchten Knochen – dies wird entsprechend im Sinne der Warmblütigkeit von *Tyrannosaurus rex*

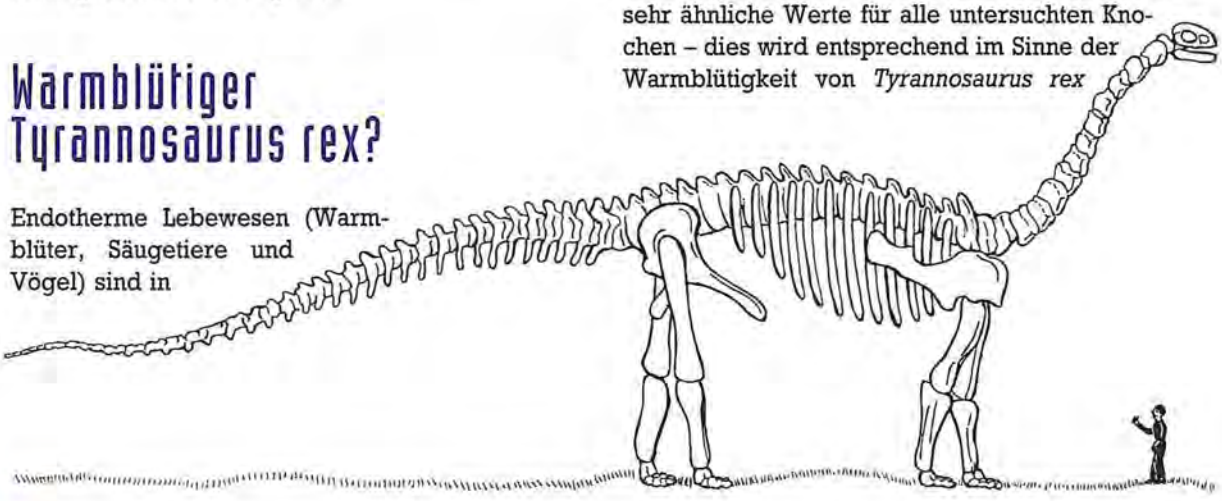


Abb. 2: Rekonstruktion von Argentinosaurus *(nach* APPENZELLER *1994)*

gedeutet. Die folgende „heiße" Diskussion zeigte allerdings, daß nicht alle Biologen von diesen Schlußfolgerungen überzeugt sind (z.B. MILLARD 1995). Die Behauptung des Lexikon der Biologie (1994, Bd. 4, S. 263), daß die Warmblütigkeit auch der größeren Dinosaurier als gesichert gelten kann, muß man daher relativieren.

Literatur

ALDHOUS P (1995) 'Jurassic DNA' looks distinctly human. New Scientist (11. Febr.), 5.

ALLARD MW, YOUNG D & HUYEN Y (1995) Detecting Dinosaur DNA. Scinece *268,* 1192.

APPENZELLER T (1994) Argentine dinos vie for heavyweight title. Science *266,* 1805.

BARRICK RE, SHOWERS WJ (1994) Thermophysiology of Tyrannosaurus rex: Evidence from oxygen isotopes. Science *265,* 222-224.

CARPENTER K, HIRSCH KF & HORNER JR (1994) Dinosaur eggs and babies. Cambridge University Press, 372 S. (Buchbesprechung von MJ Benton: Paleoparental care, in: Trends in Ecology and Evolution, Jan 1995, p.48)

CHINSAMY A & DODSON P (1995) Inside a dinosaur bone. Am. Scientist *83,* 174-180.

GIBBONS A (1994) Possible dino DNA find is greeted with scepricism. Science *266,* 1159.

GILLETTE DG (1994) Seismosaurus: The Earth shaker. Columbia University Press, 205 S.

HEDGES SB & SCHWEITZER MH (1995) Detecting Dinosaur DNA. Science *268,* 1191-1192.

HENIKOFF S (1995) Detecting Dinosaur DNA. Science *268,* 1192.

MILLARD AR (1995) The body temperature of Tyrannosaurus rex. Science *267,* 1666; vgl dazu BARRICK et al: Response, Science *267,* 1667.

NORELL MA et al (1994) A theropod dinosaur embryo and the affinities of the Flaming Cliffs dinosaur eggs. Science *266,* 779-782

NOVACEK MJ, NORELL M, MCKENNA AC & CLARK J (1995) Die Fossilienschätze der Gobi. Spektrum der Wissenschaft, Februarheft, S.69.

WOODWARD SR (1995) Detecting Dinosaur DNA. Science *268,* 1194.

WOODWARD SR, WEYAND NJ & BUNNELL M (1994) DNA sequence from Cretaceous period bone fragments. Science *266,* 1229-1232.

ZISCHLER H, HÖSS M, HANDT O, VON HAESELER A, V. D. KUYL AC, GOUDSMIT J & PÄÄBO S (1995) Detecting Dinosaur DNA. Science *268,* 1192-1193.

Natürlicher Gentransfer in Drosophila?

Zusammenfassung: **In *Drosophila melanogaster* wurden Transposons („springende Gene") aus einer anderen Art, *D. willistoni* entdeckt. Als Überträger wird eine Milbe in Betracht gezogen. Von einigen Wissenschaftlern wird den Transposons eine wichtige Rolle in der Evolution zugewiesen. Es zeigt sich aber, daß dadurch eine Neuentstehung von genetischer Information nicht plausibler wird.**

Das Problem. Warum ließen sich Fruchtfliegen aus Laborstämmen nicht mit solchen aus der freien Wildbahn kreuzen? Auf diese Frage stießen Molekulargenetiker um etwa 1950, als sie diese Versuche mit der gewöhnlichen Fruchtfliege *Drosophila melanogaster* anstellten. Kreuzte man die Fliegen in einer bestimmten Weise, so waren die Nachkommen häufig steril oder hatten andere Anomalien. Es stellte sich schließlich heraus, daß die Wildstämme in ihrem Genom zusätzlich ein Stück DNA hatten, das die Laborstämme nicht besaßen. Es handelte sich hier um ein sogenanntes transponierbares Element der P-Gruppe.

Transposons. Transponierbare Elemente, kurz Transposons, sind kurze DNA-Stücke, die sich selbsttätig von einer Stelle des Genoms an eine andere bewegen können. Die als P-Element bezeichneten Transposons kommen u.a. bei *Drosophila* vor. Teilweise können sich die Transposons vervielfachen und benehmen sich im Genom manchmal wie zerstörerische Parasiten. Einige Wissenschaftler vermuten, daß die Transposons verkümmerte Viren sind, die die Zelle jedoch nicht mehr verlassen und nur über die Zellteilung weitergegeben werden können.

Wie Stephan D. DANIELS von der Universität von Connecticut in Storrs schließlich zeigen konnte, sind die P-Elemente in *Drosophila melanogaster* praktisch identisch mit denen einer anderen Art, *Drosophila willistoni.* Wie aber wechselte das P-Element von *D. willistoni* auf *D. melanogaster* über? Die genetische Epidemie konnte sich erst innerhalb der letzten 50 Jahre abgespielt haben, denn isoliert gehaltene Laborstämme von *D. melanogaster* waren frei von dem P-Element, es war ja Ursache für die beobachtete Inkompatibilität bei den Kreuzungsversuchen.

Des Rätsel Lösung. Margaret KIDWELL arbeitete auf dem Gebiet der P-Elemente bei *Drosophila* und sie war sich mit ihrer Arbeitsgruppe einig darüber, daß *D. willistoni* der Spender des P-Elements war, welches jetzt auch in *D. melanogaster* vorkommt. Die Verbreitungsgebiete beider Arten überlappen sich, somit ist ein Gentransfer zumindest theoretisch möglich. Unklar war aber der Über-

tragungsweg. „Es kann schließlich nicht einfach durch die Luft fliegen.", meinte KIDWELL. Ihre erste Idee war die Übertragung mittels eines Insektenvirus. Viren nehmen manchmal Gene von ihrem letzten Wirt auf und können sie an einen neuen weitergeben. Die in Betracht kommenden Viren waren aber äußerst wirtsspezifisch und nicht in der Lage, beide Arten zu infizieren.

Öfter wurden die Kulturen der Fliegen, mit denen KIDWELL und ihre Gruppe arbeitete, von Milben heimgesucht. Kenneth PETERSON, ein Doktorand aus KIDWELLs Labor, bat Marylyn HOUCK, eine Milbenspezialistin, die zufällig nur einige Zimmer weiter arbeitete, nach Mitteln und Wegen zu suchen, den Parasiten auszurotten. Als HOUCK schließlich die Milben mit dem Elektronenmikroskop untersuchte, stellte sie fest, daß es sich um *Proctolaelaps regalis* handelte. Diese Milbe frißt an den Fliegeneiern und saugt mal an diesem mal an jenem. Und noch etwas fiel auf: Die Mundwerkzeuge der Milbe zeigten eine verblüffende Ähnlichkeit mit jenen haarfeinen Glaspipetten, mit denen man Gene direkt in Zellen injizieren kann. Könnte es nicht sein, daß *P. regalis* zuerst an einem *D. willistoni*-Ei und anschließend an einem Ei von *D. melanogaster* saugte? Die Milbe könnte das P-Element sozusagen als „Rüsselschmutz" übertragen haben. Da P-Elemente mobil sind, konnte es sich stabil in das Erbgut des neuen Eis integrieren und die schlüpfende Fliege enthielt das neue P-Element. „Wir behaupten jedoch nicht, daß wir gezeigt haben, die Milbe sei der Überträger," so KIDWELL, „aber es könnte möglich sein." So züchten die Wissenschaftler nun im Labor gemischte Populationen aus *D. melanogaster* mit *D. willistoni* zusammen mit *P. regalis* in der Hoffnung, das Experiment, das möglicherweise in der Natur abgelaufen ist, im Labor nachzuvollziehen.

Auswirkungen auf die Evolution? Im Sommer 1992 trafen sich Genetiker in Athen, um über die Transposons und ihre Konsequenzen für die Evolutionstheorie zu diskutieren. Wenn Transposons tatsächlich, auf welchem Weg auch immer, Artgrenzen überschreiten könnten, so die Wissenschaftler, spräche das noch stärker für eine Urheberschaft am evolutionären Wandel. MCDONALD, der Organisator der Konferenz meint: „Die traditionelle darwinistische Ansicht ist, daß die Evolution allmählich fortschreitet, indem sich Punktmutationen ansammeln, und daß durch Selektion alles, was nicht gut ist, verworfen wird. Mit den Transposons ist die Sache nun aber die, daß sie gewöhnlich innerhalb kürzerer Zeitspannen Makromutationen erzeugen – erkennbar als plötzlich auftretende erhebliche Veränderungen im Erscheinungsbild, im Phänotyp der Organismen." Nun gehören die beiden *Drosophila*-Arten demselben Grundtyp an. Es dürfte sich an der Plausibilität makroevolutiver Übergänge nicht viel ändern, wenn Gene einer Fliege in eine andere derselben Gattung übertragen werden.

Manche Biologen gehen jedoch weiter. So denkt POLLARD daran, daß die Sprünge im fossilen Material auf Transposons zurückgehen könnten. Die Transposons könnten für das schubartige, durch längere stationäre Phasen unterbrochene Evolutionsmuster mitverantwortlich sein. Seiner Ansicht nach ist denkbar, daß durch besondere Umweltbedingungen das Springen der Transposons vermehrt ausgelöst wird und die Organismen dadurch leichter mutieren.

Sicherlich können Transposons den Phänotyp eines Organismus rasch ändern, indem sie in Regulator- oder Strukturgene springen, aber dadurch wird keine neue Information gewonnen, mithin handelt es sich nicht um Makroevolution. Letztlich erhöhen Tranposons lediglich die Mutationsrate, allenfalls werden vorhandene Gene „neu gemischt" oder dupliziert, aber es entsteht nichts wirklich Neuartiges. Selbst wenn eine sinnvolle Übertragung von Genen zwischen verschiedenen Grundtypen möglich wäre, bleibt dennoch die Frage ungeklärt, wie diese Gene einmal entstanden sind. Normalerweise kodieren Transposons lediglich Enzyme, die das Springen ermöglichen oder erleichtern. Die Herkunft dieser Information ist ihrerseits unklar.

Das Springen dazu prädestinierter Gene stellt einen Mutationtyp dar, der von den Gründern der Genetik nicht vorherzusehen war. Ein Teil der bisher beobachteten Mutationen in Lebewesen geht sicherlich auf Transposons zurück. Allerdings zeigt sich bisher, daß Transposons nicht mehr „können" als andere Mutationen auch, sonst hätte man sie sicherlich früher endeckt und evolutive Änderungen an ihnen festmachen können. Dies ist aber nicht gelungen. Die Erwartungen an sie als Schrittmacher der Evolution resultieren meines Erachtens aus der Erkenntnis, daß ein Mechanismus der Entstehung von genetischer Information nach wie vor unbekannt ist.

Ergänzend möchte ich auf Untersuchungen von SCHERER (1995) hinweisen, der meint, daß selbst bei einer Erhöhung der Mutationsrate, die eventuell durch Transposons ausgelöst werden könnte, um den Faktor 10 die Entstehung neuer Strukturen (= Makroevolution) selbst bei einem angenommenen Weltalter von etwa 4 Milliarden Jahren sehr unwahrscheinlich sind.

Klaus Neuhaus

Literatur

MARX J (1991) A „Mitey" Theory for Gene Jumping. Science *253*, 1092-1093.

RENNIE J (1993) Neue Drehs der DNA. Spektrum Wissensch. Mai, 33-40.

SCHERER S (1995) Höherentwicklung bei Bakterien: Ist ein molekularer Mechanismus bekannt? In: MEY J, SCHMIDT R & ZIBULLA S (Hg) Streitfall Evolution. Stuttgart: Wiss. Verlagsges., im Druck.

Präkambrische Fossilien

Für DARWIN war das damalige Fehlen präkambrischer Fossilien ein Rätsel. J. W. SCHOPF von der University of California in Los Angeles hält dieses „Dilemma" (wie er es bezeichnet) für gelöst: Über 3.000 Taxa von Mikrofossilien aus nahezu 400 geologischen Formationen sind inzwischen entdeckt worden. Dennoch ist eine Evolution *vielzelligen* Lebens durch diese Fossilbelege nicht dokumentiert, denn bei den gefundenen Organismen handelt es sich – bis auf einige Ausnahmen dicht an der Präkambrium-Kambrium-Grenze (s. u.) – um einzellige Organismen oder um koloniebildende Prokaryoten. „Der präkambrische Äon war das Zeitalter des mikroskopischen Lebens", stellt SCHOPF fest. Die ersten vielzelligen Algen (Rotalgen) werden auf 800 Millionen Jahre datiert, die ersten wirbellosen Tiere auf 600 Millionen Jahre (die Grenze Präkambrium-Kambrium liegt bei ca. 570 Millionen Jahren). Die kambrische Explosion (vgl. STEPHAN 1994) wird durch diese Fossilien nicht erklärt.

Der Ursprung des Lebens wird sehr früh in der Erdgeschichte datiert, weit früher, als bislang angenommen wurde. So wurden erst kürzlich zellulär erhaltene Mikroorganismen im Apex Chert in Westaustralien gefunden, die auf 3,46 Milliarden Jahre datiert werden. Damit macht nach dem evolutionären Szenario die Ära der Mikroorganismen 85% der belebten Erdgeschichte aus. Bemerkenswerterweise ähneln die 11 Arten, die von den ältesten Fossilablagerungen stammen, heutigen Cyanobakterien, die zu den höchstevolvierten Bakterien gerechnet werden.

Das Tempo und der Charakter der postulierten Evolution in beiden Phasen (vor und nach der Kambrium-Untergrenze) erweisen sich als sehr unterschiedlich. Vor dem Kambrium war das Evolutionstempo extrem langsam; Innovationen betrafen die Biochemie und den intrazellulären Bereich. In der zweiten Phase, dem sog. Phanerozoikum ab dem Kambrium, war die Geschwindigkeit dagegen erheblich schneller, und Veränderungen und evolutionäre Neuheiten betrafen die äußere Form. Es kommt zu adaptiven Radiationen und „explosivem" Auftreten neuer Formen einerseits und zu gelegentlichem Massenaussterben andererseits. Hier muß kritisch angemerkt werden, daß mangels Belegen eine intrazelluläre und biochemische Evolution im Präkambrium ein bloßes Postulat der Evolutionslehre darstellt, insbesondere da – wie erwähnt – die ältesten bekannten Formen heutigen spezialisierten Formen gleichen.

SCHOPF befaßt sich auch mit dem oft vorgebrachten Argument, daß die präkambrischen Organismen zu zart gewesen seien, um in geologischen Ablagerungen erhalten werden zu können. Dieses Argument sei angesichts der heute vorliegenden Fülle an Mikroorganismen widerlegt. „Trotz ihrer Kleinheit und zarten Natur sind sie durch genau denselben Prozeß (Abdruck oder Versteinerung) erhaltbar wie fossile Bäume oder Pflanzenteile" (S. 377).

Reinhard Junker

Literatur

SCHOPF JW (1994) The early evolution of life: solution to Darwin's dilemma. Tr. Ecol. Syst. *9*, 375-377.

STEPHAN M (1994) Neuere Forschungen zur Lebewelt im Kambrium und Jung-Präkambrium – ein Überblick. Stud. Int. J. *1*, 4-11.

Wiederbelebung von Bakteriensporen aus Dominikanischem Bernstein?

R.J. CANO und seine Mitarbeiter erregten durch die 1993 veröffentlichte DNA-Sequenz aus einem in Bernstein erhaltenen Rüsselkäfer Aufmerksamkeit. Außergewöhlich daran war, daß dem Bernstein ein Alter von 120-135 Millionen Jahre zugeordnet wird. Jetzt macht dieselbe Arbeitgruppe erneut von sich reden.

Aus Abdominalgewebe einer stachellosen Biene, die in dominikanischem Bernstein (auf 25 - 40 Millionen Jahre datiert) eingeschlossen war, konnten CANO et al. Sporen von Bakterien (Dauerformen von Bakterien, die unter ungünstigen Lebensbedingungen bei nicht mehr nachweisbarem Stoffwechsel überleben können) isolieren. Dabei versuchten sie, durch eine Vielzahl von Vorsichtsmaßnahmen und Kontrollversuchen, Kontaminationen auszuschließen. Schon in einer früheren Arbeit hatten dieselben Autoren aus Abdominalgewebe einer in Bernstein konservierten Biene bakterielle DNA untersucht und beschrieben.

Nach Sterilisation der Oberfläche wurde der Bernstein aufgebrochen und ein Kulturmedium mit Abdominalgewebeproben beimpft und bebrütet. In einem erhaltenen Isolat wurden *Bacillus*-Zellen gefunden, welche enzymatisch, biochemisch und durch Analyse von 16S ribosomaler DNA charakte-

risiert wurden. Die Resultate ergaben, daß die aus der Bernsteinbiene isolierten Bakterien sehr ähnliche Eigenschaften zeigen, wie das heutige Bakterium *Bacillus sphaericus*. Die heutigen Vertreter leben ebenfalls in Bienen. Die Autoren deuten an, daß sie inzwischen zwei weitere *Bacillus*-Arten. kultiviert und identifiziert hätten. Daneben sollen noch über 100 bakterielle Isolate aus Bernstein verschiedenen Alters vorliegen, aber noch nicht abschließend untersucht sein (dabei soll die Ausbeute 0,05 Isolate pro Gramm Bernstein betragen).

Für Mikro- und Molekularbiologen ist es bisher unvorstellbar, wie Bakteriensporen mehr als 10.000 Jahre überleben können. Die bisher am Besten dokumentierte Überlebenszeit für Bakteriensporen betrug laut SETLOW ca. 70 Jahre. Louis PASTEUR (1822-1895) hatte vor einem Jahrhundert Sporen in Ampullen versiegelt, die 1956 untersucht und dabei als lebensfähig beschrieben wurden. Verglichen mit diesem Befund werden in der von CANO et al. veröffentlichten Arbeit Überlebenszeiten von Bakteriensporen behauptet, die um einen Faktor von ca. 500.000 höher liegen, ohne daß dies bisher theoretisch nachvollziehbar wäre.

Man muß entweder nach völlig neuartigen Mechanismen suchen, wie Sporen insgesamt stabilisiert werden können oder man muß zeigen, daß die Bernstein-Isolate durch rezente Bazillen infiziert waren. Für den Fall, daß beide Versuche negative Resultate liefern, müßte man die dem dominikanischen Bernstein und damit auch dessen Inklusen zugeordneten Alter in Frage stellen.

Harald Binder

Literatur

CANO RJ & BORUCKI MK (1995) Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old dominician amber. Science *268*, 1060-1064.

FISHMAN J (1995) Have 25-million-year-old bacteria returned to life? Science *268*, 977.

Kospeziation und Koevolution in zwei Fällen widerlegt

Unter den Kuckucksvögeln sind eine ganze Reihe brutparasitierender Arten bekannt. Unser einheimischer Kuckuck beobachtet die Nester seiner Wirtsvögel, legt je ein Ei in deren Nester (z.B. in das der Bachstelze) und entfernt dafür eines der Wirtseier. Das Ei ist in Größe und Färbung denen der Wirtsart sehr ähnlich. Der frischgeschlüpfte Kuckuck wirft dann Wirtseier und Stiefgeschwister kurzerhand aus dem Nest, um Nahrungskonkurrenten auszuschalten.

Einige afrikanische Witwenvögel gehen nicht ganz so rücksichtslos vor: Sie legen als Brutschmarotzer ihre Eier in die Nester bestimmter Prachtfinkenarten und lassen ihre Jungen zusammen mit denen der Wirtsart aufziehen. Zwischen den ausgewachsenen Vögeln einer bestimmten Prachtfinkenart und ihrem jeweiligen Brutparasiten besteht keine Ähnlichkeit, aber die Jungvögel sind hinsichtlich Gefieder, Rachenzeichnung, Lauten und Bettelverhalten nicht voneinander zu unterscheiden. Seit einigen Jahrzehnten wird daher angenommen, daß Rassen- und Artbildung innerhalb der jeweiligen Gruppen parallel erfolgten, die Arten also koevolvierten (NICOLAI 1964). Diese These konnte kürzlich überzeugend widerlegt werden (KLEIN et al. 1993): Molekulargenetische Untersuchungen konnten zeigen, daß die Artbildung der Witwenvögel wesentlich später erfolgte als die der Prachtfinken. Außerdem stimmten die rekonstruierten Verzweigungsmuster des Stammbaums der Parasiten nicht mit dem ihrer Wirtsvögel überein. Von Kospeziation kann also keine Rede sein.

Als Alternative wird Artbildung durch Kolonisation diskutiert. Darnach hätten die Brutparasiten die Wirtsarten erst besiedelt, nachdem diese sich bereits in verschiedene Arten aufgeteilt hatten. Eine Neubesiedlung ungewöhnlicher Wirtsarten kann man sich so vorstellen, daß Witwenweibchen ihre Eier in die „falschen" Nester legen und die Jungen auf den Gesang der neuen Prachtfinkenart geprägt werden. Solche geschlechtsreife Parasitenweibchen werden Männchen ihrer eigenen Art bevorzugen, die den Gesang ihrer Pflegeeltern vortragen, weil sie ebenfalls im Wirtsnest aufgewachsen sind. Ein Beleg für diese „kulturelle Artbildung" stellt die Beobachtung männlicher Witwenvögel mit einem für die Art untypischen Gesang dar. Eine kürzlich veröffentlichte Feldstudie (PAYNE & PAYNE 1994) ergab außerdem Anhaltspunkte für die gegenwär-

Koevolution: Gemeinschaftliche, sich gegenseitig beeinflussende Evolution zweier Organismen oder Taxa (Organismengruppen), die z. B. in gegenseitiger Abhängigkeit leben (Wirt und Parasit; Blütenpflanze und Bestäuber usw.). Koevolution gilt als klassischer Beleg für das Wirken von Selektion.
Kospeziation: Gemeinschaftliche Artbildung von in Abhängigkeit voneinander lebenden Arten.

tige Erschließung neuer Wirts-Parasiten-Beziehungen, die diese Vermutung bestätigen. Die Natur liefert uns in diesem Fall ein natürliches Labor, in dem heutige Artbildungsprozesse sozusagen vor den Augen der Beobachter ablaufen und in ihren Mechanismen studiert werden können. Allerdings muß vorausgesetzt werden, daß bei der erstmaligen Besiedlung die Wirtsarten das fremde Ei nicht erkennen und das ausgeschlüpfte Jungtier den eigenen Nachkommen ähnlich genug ist, daß es großgezogen wird. Man muß also einen gewissen Grad an Präadaptation (Vor-Anpassung) voraussetzen, damit eine Kolonisation eingeleitet werden kann.

Ein weiteres Beispiel gegen Koevolution scheinen die Beziehungen von Läusen und ihren Wirten zu sein. Bisher glaubte man, daß strikte Kospeziation und Koevolution bei Läusen vorherrschte, was detaillierte Untersuchungen jedoch als falsch erwiesen haben.

Konsequenterweise wurde daher gefordert, daß der Grundsatz, daß Läuse und ihre Wirte immer gemeinsam evolvierten, fallengelassen werden sollte. Interessanterweise eröffnet sich dadurch sogar ein tieferer Einblick in biologische Zusammenhänge, als dies vorher der Fall war (BARKER 1994).

Judith Fehrer

Literatur

BARKER SC (1994) Phylogeny and classification, origins, and evolution of host associations of lice. Int. J. Parasitol. *24,* 1285-1291.

KLEIN NK, PAYNE, RB & NHLANE MED (1993) A molecular genetic perspective on speciation in the brood parasitic Vidua finches. Proc. VIII Pan-Afr. Orn. Congr. 29-39.

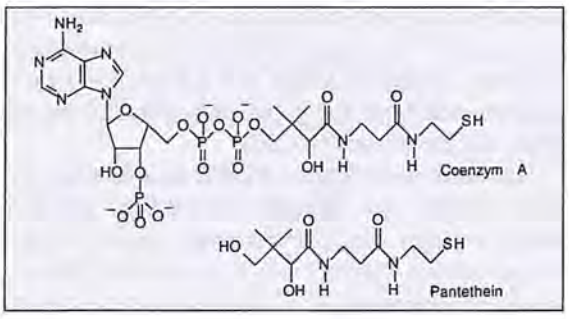
NICOLAI J (1964) Der Brutparasitismus der Viduinae als ethologisches Problem. Z. Tierpsychol. *21,* 129-204.

PAYNE RB & PAYNE LL (1994) Song mimicry and species associations of west African indigobirds Vidua with Quail-finch Ortygospiza atricollis, Goldbreast Amandava subflava and Brown Twinspot Clytospiza monteiri. Ibis *136,* 291-304.

STREIFLICHTER

Coenzym aus der Ursuppe?

Die Beteiligung von Coenzym A an vielen enzymkatalysierten Reaktionen legt für KEEFE et al. die Vermutung nahe, daß dieses Molekül mit seinen katalytischen Eigenschaften schon in einem frühen Stadium der Entstehung des Lebens beteiligt war. Dabei ist seine Fähigkeit zur Aktivierung von Aminosäuren und Hydroxysäuren bei der Biosynthese von Peptidantibiotika von besonderer Bedeutung. Für die chemischen Substrukturen von Coenzym A: ß-Alanin, Pantoyllakton, Cysteamin und möglicherweise auch Adenosin, konnte gezeigt werden, daß sie durch potentiell präbiotische Synthese hergestellt werden können. KEEFE et al. zeigen, daß die Coenzym A-Untereinheit Pantethein (welche auch in anderen Enzymen auftritt) in Ausbeuten um 1% durch Erhitzen von Pantoyllakton, ß-Alanin und Cysteamin bei Temperaturen von nur 40°C synthetisiert werden kann. Dazu müssen die Ausgangsstoffe jedoch in genügend hoher Konzentration vorliegen. Die Autoren argumentieren, daß es aufgrund der hohen Wasserlöslichkeit der Komponenten vorstellbar ist, daß in trockenfallenden Wasserkörpern wie z.B. an Stränden oder am Rand von Lagunen eine Aufkonzentrierung erfolgt. Die Synthese von Coenzym A, dem Adenosindiphosphat-Derivat von Pantethein, ist nicht gelungen.



FERRIS würdigt diese Untersuchungen in einem einführenden Kommentar als „Experimente, die zeigen, daß diese biologisch aktiven Moleküle möglicherweise in von der Sonne getrocknetem Schlamm, der am Rand von ausgetrockneten Teichen oder Lagunen zurückbleibt, gebildet worden sein können".

Die Frage, ob von einem in der heute bekannten Biochemie bedeutenden Coenzym auf dessen Funktion in einer frühen Phase der „Lebensentstehung" geschlossen werden kann, wird in den Artikeln nicht diskutiert. Die unzureichende Selektivität bei einzelnen Syntheseschritten sowie eine noch ausstehende plausible Erklärung für eine Zusammenführung der unter verschiedenen Bedingungen synthetisierten Komponenten stellen ein bisher ungelöstes Problem in präbiotischen Modellumgebungen dar. [KEEFE AD, NEWTON GL & MILLER SL (1995) Nature, *373,* 683-685; FERRIS JP (1995) ibid., 659.] *HB*

Ursuppe – RNA-Welt – DNA-Protein-Welt

Die Idee einer RNA-Welt (RNA World) wird von vielen Wissenschaftlern favorisiert, die sich gegenwärtig an den Diskussionen möglicher Szenarien zur Lebensentstehung beteiligen. Diese Vorstellung geht davon aus, daß „die ersten Lebewesen RNA Moleküle mit katalytischer Aktivität waren" (ROBERTSON & MILLER 1995). Die sogenannten Ribozyme werden dabei als Vorläufer der Enzyme betrachtet. Das bisher beschriebene Spektrum an katalytischer Aktivität dieser RNA-Moleküle ist jedoch sehr beschränkt.

ROBERTSON & MILLER konnten zeigen, daß 5-Hydroxymethyluracil (HMU) mit einer Vielzahl von Verbindungen wie Ammoniak, Glycin, Guanidin, Schwefelwasserstoff, Cyanwasserstoff, Imidazol, Indol und Phenol reagiert, unter Bildung von 5-substituierten Uracilderivaten. HMU kann aus Uracil und Formaldehyd synthetisiert werden, wobei von Uracil aus früheren Arbeiten bekannt ist, daß es in potentiell präbiotischen Synthesen mit Ausbeuten von unter 1% erhalten werden kann.

Unter den 5-substituierten Uracilderivaten finden sich auch solche, die man von modifizierten Basen aus Transfer-RNA (tRNA) kennt. Einige der Produkte könnten chelatbildende Eigenschaften aufweisen, d.h. Metallionen und Wassermoleküle für katalytische Vorgänge in geeigneter Weise positionieren (eine Eigenschaft, die für Ribozyme diskutiert wird). Viele Produkte dieser Art kann man als Analoga von Aminosäuren auffassen.

Die vorgestellten Syntheseprodukte werden von den Autoren als mögliche Verbindung zwischen der postulierten RNA-Welt und den heute bekannten DNA-Protein-Systemen diskutiert. Um diese Vorstellung beurteilen zu können, muß sie erst noch als konkretes Modell formuliert und experimentellen Tests zugänglich gemacht werden. Die bisher erzielten Ausbeuten für den gesamten Syntheseweg zeigen die Unmöglichkeit einer präbiotischen Bildung. Um eine solche plausibel zu machen, sind hochselektive Einzelschritte für eine vielstufige Reaktion zu fordern. [ROBERTSON MP & MILLER SL (1995) Science *268*, 702-705] *HB*

„Beckenknochen" der Walartigen: keine Rudimente

Die Abdominalknochen der Walartigen, die meist aus einem einfachen Knochenstab bestehen, gelten als Paradebeispiel für Rudimentation (Rückbildung der Beckenknochen von Landwirbeltieren). Es ist schon lange bekannt, daß diese Knochen als Ansatzstellen für Darm- und Genitalmuskulatur dienen. So kann der ausgesprochen bewegliche Walpenis mit Hilfe des kräftigen Penis-Retraktor-Muskels in den Körper zurückgezogen werden; dieser Muskel setzt an den Abdominalknochen an. Andere ebenfalls am Abdominalknochen ansetzende Muskeln ermöglichen windende Suchbewegungen des Penis. Die Bedeutung der Abdominalknochen wurde nun durch neuere Untersuchungen weiter (indirekt) unterstrichen. Es hat sich herausgestellt, daß der Walpenis auch als Riechorgan eingesetzt wird. Die Glans des Schweinswal-Penis ist mit feinsten Sinneshärchen bestzt, auf denen Chemorezeptoren entdeckt wurden, also zelluläre Empfangsstationen für Gerüche und Geschmack. Vermutlich wird der Penis durch von der Vagina ausgehende Duftsignale mit Hilfe dieser Chemorezeptoren gesteuert. Mit dieser Entdeckung wird die funktionale Bedeutung der Abdominalknochen der Wale weiter unterstrichen. Damit wird das evolutionstheoretische Argument geschwächt, es handle sich bei diesen Knochen um Rückbildungen, da der rudimentäre Charakter solcher Strukturen gewöhnlich durch Nichtfunktionalität oder schwache Funktionalität begründet wird. Ein theorieunabhängiger Hinweis auf evolutionäre Rückbildung kann aus den Abdominalknochen der Walartigen nicht abgelesen werden. [BEHRMANN G (1995) Säugetierkd. Inf. *3*, 611] *RJ*

Kopie eines Bumerangs aus dem Paläolithikum mit guten Flugeigenschaften

Bumerange sind aus allen Kontinenten bekannt, nicht nur, wie oft vermutet, aus Australien. Wir kennen sie von Höhlenmalereien in Nordafrika (datiert auf 7.000 Jahre v. Chr.), von den Eskimos, den Hopi, den Polynesiern und den Indianern. In Europa gibt es Funde eines solchen knieförmigen Wurfholzes aus der Eisenzeit (300 v. Chr., Holland) und aus dem Mesolithikum (5.000 v. Chr., Dänemark). Besonderes Interesse fand jetzt das Stück eines Mammut-Stoßzahnes, das 1985 in Südpolen bei archäologischen Untersuchungen in einer Höhle entdeckt wurde und das charakteristische Merkmale eines Bumerangs aufwies. Dieser bemerkenswerte Fund (älteste Waffe dieser Art) wurde von VALDE-NOWAK et al. (1987; vgl. BAHN 1987) beschrieben. Das Elfenbeinstück wurde zusammen mit dem gesamten Fundkomplex der Pavlov-Kultur zugeordnet (ca. 23.000 Jahre alt). Inzwischen ergaben ^{14}C-Datierungen ein Alter von 20.300 Jahren.

Der Bumerang, das einzig bekannte Stück aus Elfenbein aus der Frühgeschichte, weist eine Länge von ca. 71 cm, eine größte Breite von etwa 6 cm und eine maximale Dicke von 1,5 cm, bei einem Gewicht von etwa 800 g auf (ungewöhnlich große Maße für ein solches Objekt).

Mit einer Plastikkopie, welche dasselbe spezifische Gewicht wie Elfenbein (1,8-1,9 g/cm^3) aufweist, wurden nun Wurfversuche unternommen. Dabei wurden Weiten bis zu 66 m (leichter Gegenwind), bei Geschwindigkeiten um 21,4 m/s erreicht.

Das Flugobjekt kehrt dabei nicht zum Ausgangspunkt zurück und wäre damit je nach Definition streng genommen gar nicht als Bumerang, sondern als Wurfholz („killing stick") zu bezeichnen. BAHN (1995) weist in seinem Bericht darauf hin, daß die feinen Details der Elfenbeinschnitzerei offensichtlich in der Absicht vorgenommen wurden, die Stabilität und die ballistischen Eigenschaften des Bumerangs zu verbessern. Dies zeigt, daß der Hersteller genau wußte, was er tat und daß diese Präzision von einer langen Tradition der Produktion dieser Waffen (die Autoren vermuten Jagdwaffe für das Erlegen von Kleinwild) zeugt. [BAHN PG (1987) Nature *329,* 388; BAHN PG (1995) Nature *373,* 562; VALDE-NOWAK P, NADACHOWSKI A & WOLSAN M (1987) Nature *329,* 436-438] *HB*

„Schnelle" Miesmuscheln

Zwei Arten der narinen Miesmuschelgattung *Mytilus* sind einander morphologisch sehr ähnlich. Die Art *M. galloprovincialis* lebt im Mittelmeer, während die Art *M. trossulus* an der kalifornischen Küste vorkommt. Durch Vergleich von mitochondrialen Genen gelang John GELLER von der University of North Carolina der überraschende Nachweis, daß die kalifornische Art südlich von San Francisco heute gar nicht vorkommt und ausschließlich *M. galloprovincialis* angetroffen wird. Die genetische Analyse von getrockneten Exemplaren, welche um 1900 gesammelt wurden, zeigte allerdings klar, daß damals die kalifornische Art vorherrschte. Exemplare, die 1947 gesammelt wurden, gehörten dann zu *M. galloprovincialis.* Irgendwann dazwischen muß die mediterrane Art, die wahrscheinlich in den Ballasttanks von Schiffen nach Kalifornien eingeschleppt wurde, die in Südkalifornien heimische Art vollständig ersetzt haben. Wegen der äußerlichen Ähnlichkeit der Muscheln war dies den Biologen nicht aufgefallen. Weil die Muschel nicht etwa kleine ökologische Nischen besetzt, sondern außerordentlich häufig vorkommt, war eine in derart kurzer Zeit ablaufende, vollständige und weiträumige Verdrängung einer Art durch eine eingewanderte Art ausgesprochen unerwartet. Die zugrundeliegenden Selektionsmechanismen sind unbekannt. [CULOTTA E (1995) Science *267,* 331] *SS*

Molekulare und morphologische Stammbäume: Harmonie oder Konflikt?

1987 gab Colin PATTERSON das Buch *Molecules and morphology in evolution: conflict or compromise?* heraus. Der Anlaß für das Buch war der Befund, daß evolutionäre Stammbäume, die auf molekularen Sequenzen beruhen, sich oft von den Stammbäumen unterschieden, denen die Morphologie zugrunde lag. Nun nahmen PATTERSON et al (1993) eine Neubewertung der Befundlage vor. Sie gehen dabei auf zahlreiche neue Daten aus dem Tier- und Pflanzenreich ein, die in der Zeit von 1987 bis 1992 gewonnen wurden. Die meisten Überlegungen betreffen höhere taxonomische Kategorien oberhalb des Familien-Niveaus. Die Übereinstimmung zwischen molekularen und morphologischen Phylogenien scheinen nun nicht besser auszufallen, als dies 1987 der Fall war. Nur wenige taxonomische Gruppen weisen vollständig passende Stammbäume auf, wenn verschiedene Untersuchungsmethoden angewendet werden. Widersprüche scheinen umso mehr aufzutreten, je mehr Gruppen berücksichtigt, je mehr Merkmale betrachtet werden und je höher der betrachtete taxonomische Level gewählt wird. Dabei widersprechen molekulare Stammbäume einander in gleichem Maße wie molekulare und morphologisch begründete Phylogenien. Werden alle Stammbäume zu einem „consensus tree" kombiniert, bleiben typischerweise nur wenige passende Eigenschaften übrig. Die Schlußfolgerung der Autoren ist pessimistisch bezüglich der Möglichkeit, daß Evolutionstheoretiker jemals in der Lage sein werden, einen einzigen, einigermaßen widerspruchsfreien Verwandtschaftsbaum aller Lebewesen zu konstruieren. [PATTERSON C, WILLIAMS DM & HUMPHRIES CJ (1993) Congruence between molecular and morphological phylogenies. Ann.Rev. Ecol. Syst. *24,* 153-188] *RJ; Übersetzung aus „Origins 21" / Geoscience Research Institute*

Corrigendum

In der letzten Ausgabe von Studium Integrale Journal (2, 1995, S. 37-39) wurde im Beitrag „Überraschungen bei Tiefbohrung" über die Entdeckung von Mikroorganismen in den Paragneisen der KTB-Bohrung berichtet. Nach den uns zur Zeit vorliegenden mündlichen Informationen konnte dieser Befund nicht bestätigt werden.

Thomas Fritzsche

Leserpost an den Herausgeber

Leserbriefe an Studium Integrale *journal* sind erwünscht. Dabei spielt keine Rolle, ob sich der Inhalt auf Beiträge des Journals bezieht oder andere Themen aus dem Spektrum der Zeitschrift betrifft. Die Entscheidung über eine Publikation trifft das Redaktionsteam. Autoren, auf deren Beitrag eingegangen wurde, werden in der Regel zu einer Antwort eingeladen. Senden Sie Ihre Post an die Adresse des Herausgebers (s. Impressum).

Michael A. Cremo & Richard L. Thompson: Verbotene Archäologie. Sensationelle Funde verändern die Welt. Aus dem Amerikanischen von Werner Petermann. Bettendorf'sche Verlagsanstalt, Essen, München, Bartenstein, Venlo, Santa Fe, 1994. (440 S., DM 44,–)

Das vorliegende Buch enthält eine umfangreiche Darstellung von Funden aus dem Tertiär, die ca. zwischen 1860 und 1925 von nicht wenigen Forschern menschenartigen Lebewesen oder sogar echten Menschen zugeschrieben wurden. Die wichtigsten Fundorte liegen in Frankreich, Italien, Belgien, England, Portugal und Argentinien. Es handelt sich einmal um anscheinend mit Absicht zerbrochene Säugetierknochen und charakteristische Schnittspuren auf solchen (S. 43-108), weiter um einfach gefertigte Steinwerkzeuge, die Eolithen genannt wurden und etwa mit den gegenwärtig anerkannten Oldovan-Werkzeugen vergleichbar sind (S. 109-200) sowie paläolithische Werkzeuge, die den bekannten Acheuléen-Industrien des *Homo erectus* aus dem Pleistozän ähneln oder sogar Moustérienartig wirken (S. 201-273). Untergeordnet wurden auch verbesserte Paläolithen und vereinzelt sogar neolithisch anmutende Fertigungstechniken beschrieben (S. 274-322; vgl. zu den pleistozänen Werkzeugen HARTWIG-SCHERER 1991, 79-92). Selbst Knochen bis hin zu vollständigen Skeletten von modern aussehenden Menschen hat man gelegentlich im Tertiär ergraben (S. 323-350). Zum Schluß behandeln die Autoren neben den heute anerkannten Hominidenfunden neuere brisante, aber umstrittene Entdeckungen aus dem Pleistozän, die kaum ins gegenwärtig vorherrschende Evolutionsbild menschlicher Abstammung passen (S. 351-408). Bibliographie (S. 413-433) und Register (S. 434-440) beschließen das Werk.

Die Brisanz des Buches wird sofort deutlich, wenn man sich vor Augen hält, daß menschliche Hinterlassenschaften aus einer so frühen Zeit wie dem Tertiär die gegenwärtigen evolutionstheoretischen Vorstellungen zur Abstammung des Menschen widerlegen würden. Bekannte Funde wie *Australopithecus, Homo habilis* und vielleicht sogar *Homo erectus* verlören ihre Bedeutung für die postulierte Hominidenevolution.

Die Autoren setzen mit der Historischen Geologie lange Zeiträume voraus (S. 29-31) und bejahen – entgegen manchen Formulierungen, die das Gegenteil zu sagen scheinen – eine Makro-Evolution, und zwar im Sinn der Theorie vom unterbrochenen Gleichgewicht nach GOULD & ELDREDGE, da sie weder der „Darwinsche Evolutionismus" noch der „biblische Schöpfungsmythos" zufriedenstellt (S. 222-228). Daß die Verfasser weltanschaulich im indisch-hinduistischen Denken beheimatet und an einem (nicht näher beschriebenen) Bhaktivedanta-Institut tätig sind, hat keinerlei erkennbare Spuren im Buch hinterlassen; der Leser erfährt dies nur aus dem Klappentext.

CREMO & THOMPSON wollen zeigen, warum die tertiären, ihrer Meinung nach großenteils gutbegründeten Funde von der wissenschaftlichen Gemeinschaft nach kurzzeitiger, teilweiser Anerkennung immer stärker mit Skepsis betrachtet und schließlich verworfen wurden bzw. in Vergessenheit gerieten. Darum spricht der Untertitel der Originalausgabe von einer „verheimlichten" Geschichte menschlicher Ursprünge (The Hidden History of the Human Race), im Gegensatz zum reißerisch klingenden deutschen Untertitel; denn die beschriebenen Funde haben die Welt ja gerade nicht verändert. Dazu paßt, daß das Werk in keinem ausgesprochenen Wissenschaftsverlag erschienen ist. Im Buchtext selbst finden sich gelegentlich Unstimmigkeiten und bei manchen bibliographischen Angaben wurde versäumt, die Titel im Literaturverzeichnis nachzuweisen (im wesentlichen bei neueren Büchern). Möglicherweise gehen diese Mängel auf den Übersetzer zurück. Es ist auch nirgends vermerkt, daß die deutsche Ausgabe gegenüber dem sehr umfangreichen Original um mehr als die Hälfte gekürzt wurde. Da die 952-seitige amerikanische Ausgabe auch einen Abschnitt „über den Yeti und andere wilde Männer Asiens, Afrikas usw" enthält (so STARCK 1995), den die deutsche Übersetzung wegläßt, dürfte „Verbotene Archäologie" eine Kürzung auf das Wesentliche darstellen.

Bekannte Funde wie Australopithecus, Homo habilis und vielleicht sogar Homo erectus verlören ihre Bedeutung für die postulierte Hominidenevolution.

Das Werk wird in zwei dem Rezensenten vorliegenden Buchbesprechungen entschieden abgelehnt (ADAM 1995, STARCK 1995). Bemängelt wird u.a., daß es sich bei den Buchautoren nicht um Paläanthropologen oder Urgeschichtler handelt, sondern um einen Mathematiker und einen Wissenschaftshistoriker. Weiterhin weisen die genannten Rezensenten zurecht darauf hin, daß CREMO & THOMPSON

auf keinerlei Erfahrung durch eigene Untersuchungen an Originalmaterial hinweisen können, sondern sich lediglich auf Literatur stützen.

Aber es wird in beiden Buchbesprechungen z.T. sehr fahrlässig rezensiert.So unterstellt STARCK den Verfassern, sie ordneten den Unterkiefer von Mauer morphologisch dem *Homo sapiens* zu, auch seien die Fundumstände wahrscheinlich manipuliert. Schlägt der Leser nach (S. 358f.), so findet er nichts von solchen Behauptungen, wohl aber die für das Buch grundlegende These, daß moderne Menschenformen, wenn sie in geologisch zu frühen Gesteinen gefunden werden, kaum Aussicht haben, als echt anerkannt zu werden.

Mit dieser grundlegenden These dürften die Autoren m. E. im Recht sein. Sie möchten der Wissenschaft jedoch nicht einfach Fälschungsabsichten unterstellen (wie STARCK und ADAM empört mißverstehen), sondern schreiben differenziert:

„Zwei Typen gilt es zu unterscheiden. Zum einen strittige Befunde, die für die Existenz anatomisch moderner Menschen in einer unbehaglich fernen Vergangenheit sprechen. Zum anderen Befunde, die für die derzeit herrschende Ansicht sprechen. Nach einer detaillierten Untersuchung stellte sich heraus, daß bei gleichwertiger Anwendung wissenschaftlicher Maßstäbe auf beide Gruppen diese mit gleich guten Gründen entweder zu akzeptieren oder abzulehnen sind. Tatsächlich wurden Befunde der ersten Kategorie einst von einer beträchtlichen Anzahl von Wissenschaftlern akzeptiert. Erst als eine einflußreichere Gruppe von Wissenschaftlern die Kriterien der Beweisführung bei Funden der ersten Kategorie rigoroser anwandten als bei solchen der zweiten, setzte sich diese als Lehrmeinung durch.

Wenn wir von der Unterdrückung von Beweisen sprechen, beziehen wir uns nicht auf irgendwelche wissenschaftlichen Verschwörer, die einen teuflischen Plan ausführten, um die Öffentlichkeit hinters Licht zu führen. Wir reden viel mehr über einen andauernden gesellschaftlichen Prozeß der Wissensfiltrierung, der ziemlich harmlos erscheint, aber beträchtliche Auswirkungen hat, die sich zudem verschärfen. So verschwinden bestimmte Kategorien der Beweisführung einfach aus dem Blickfeld" (S. 9f.).

Die mangelnde fachliche Kompetenz der Autoren muß das Buch m.E. nicht entwerten, denn es ist wissenschafts*historisch* angelegt. Für bestimmte wissenschaftliche Details haben sie Spezialisten befragt (S. 167, 170). Die Verfasser schildern unter Aufnahme zahlreicher und oft langer Originalzitate aus der Fachliteratur die damaligen Entdeckungen (ca. zwischen 1860 und 1925). Im Neogen (Pliozän und Miozän), gelegentlich sogar im Alttertiär (vgl. SCHWEINFURTH 1907), wurden menschliche Hinterlassenschaften von renommierten Wissenschaftlern ergraben. Ihre Funde und Deutungen publizierten sie zumeist in anerkannten Fachorganen. Diese

Tab. 1: Stratigraphische Unterteilung des Känozoikums mit Datierungsangaben nach radiometrischen Altersbestimmungen.

		Beginn vor Mio. Jahren
Quartär	Holozän	0,01
	Pleistozän	2
	Pliozän	5
	Miozän	24,5
Tertiär	Oligozän	33
	Eozän	55
	Paläozän	65

schon damals umstrittenen Funde wurden auf wissenschaftlichen Kongressen vorgestellt, umfassend diskutiert und außerdem mehrfach Kommissionen damit betraut, an Ort und Stelle die Fundsituationen zu besichtigen und selbst Grabungen unter kontrollierten Bedingungen vorzunehmen. Dabei hat man intensiv über mögliche Fehldeutungen debattiert (Stratigraphie, Umlagerung jüngerer Werkzeuge in ältere Schichten z.B. durch Karstphänomene, Echtheit der Werkzeuge, Abschlagtechniken usw.).

Bei der Lektüre solcher Fachpublikationen (probeweise wurden vom Rezensenten u.a. VERWORN 1905, KLAATSCH 1905 und FREUDENBERG 1919 eingesehen) ist eindrücklich zu lesen, daß besonders VERWORN als Darwinist derart skeptisch bezüglich der Steinwerkzeuge und der säugetierstratigraphisch ins Obermiozän eingestuften Fundorte war, daß ihn erst eigene Grabungen – gegen inneren Widerstand! – sowohl von der Werkzeugnatur der Feuersteine als auch vom biostratigraphischen Alter der Fundschicht zu überzeugen vermochten. Vergleicht man die Originalarbeit von VERWORN mit dem entsprechenden Abschnitt bei CREMO & THOMPSON (S. 234-253), so muß den Autoren bescheinigt werden, daß die entscheidenden Züge gut herausgearbeitet sind. Von daher fällt positives Licht auf das Buch.

Die Verfasser betonen, daß nicht wenige Wissenschaftler des späten 19. Jahrhunderts, obgleich fast alle Evolutionsvertreter, den tertiären Menschen für möglich hielten und daher relativ offen für entsprechende Funde waren. Die Entdeckung des Java-Menschen 1891 brachte laut CREMO & THOMPSON nach und nach den entscheidenden Umschwung. Danach hätte sich der Mensch erst im Pleistozän entwickelt; als diese Sicht zur Herrschaft gelangte, war für bereits im Tertiär existierende Menschen kein Platz mehr (S. 109 u.a.). Man könnte m. E. hinzufügen: Durch die Entdeckung der plio-pleistozänen Hominiden-Gattung *Australopithecus* (ab 1925) und ihre Deutung als Ahnen des Menschen wurden tertiäre menschliche Hinterlassenschaften erst recht problematisch, weil nicht mehr ins herrschende Paradigma einzuordnen (Die makroevolutive Deutung der Australopithecinen ist jedoch auch abge-

sehen von der Existenz echter Tertiärmenschen aus den Skelettfunden nicht zwingend abzuleiten; vgl. BRANDT 1992, 1995).

Wodurch wurde laut CREMO & THOMPSON etwa seit Beginn des 20. Jahrhunderts die Werkzeugnatur tertiärer Feuersteine als widerlegt angesehen? Es sollen – abgesehen von der obigen Konfliktsituation im Rahmen des Evolutionsparadigmas – vor allem zwei Gründe gewesen sein:

Zum einen wurde versucht zu zeigen, die Abschläge an den als Werkzeuge angesehenen Feuersteinen seien durch natürliche, geologische Prozesse entstanden (S. 157-164). Angesichts der komplexen Natur der Abschläge und ihrer Ähnlichkeit mit anerkannten pleistozänen Werkzeugen sowie dem Nachweis, daß auch heute aus den gleichen Gesteinen sehr ähnliche Werkzeuge hergestellt werden können, halten die Autoren m. E. zurecht diese These für mehr als fragwürdig. Zum anderen sollte gezeigt werden, daß der Abschlagwinkel tertiärer Geräte nicht mit dem der als echt anerkannten späteren Werkzeuge übereinstimmt. Aber diese Hypothese wurde laut CREMO & THOMPSON durch neuere Forschungen revidiert bzw. relativiert (S. 165-175).

Haben die Verfasser die Debatte um die auch „offiziell" als echt anerkannten Hominidenfunde sachgemäß wiedergegeben? Zu den OH 7- und OH 8-Funden (Hand- und Fußknochen) werden nur zwei Autoren zitiert, die diese als sehr menschlich bewerten (S. 394), während die umfassende Diskussion bei BRANDT (1995, 20-24,114-123) erkennen läßt, daß diese Knochen überwiegend dem *Australopithecus*-ähnlichen, taxonomisch umstrittenen *Homo habilis* zugeordnet werden. Auch die Anatomie der Oberschenkelknochen KNM-ER 1472 und 1481 wird als etwas zu modern-menschlich bezeichnet (S. 400), wie aus dem Vergleich mit BRANDT (1995, 82f. 88) hervorgeht. Jedoch erwähnen die Verfasser den ins Pliozän (!) eingestuften Kanapoi-Oberarmknochen (KNM-KP 271) offenbar zurecht als sehr menschlich (7f.), während über den ebenfalls sehr menschenartigen Oberarmknochen AL 333-29, auch aus dem Pliozän, nichts zu lesen ist (vgl. BRANDT 1995, 32-34). Aber dies sind nur Randfragen. Die Autoren scheinen mit der modernen wissenschaftlichen Diskussion im wesentlichen vertraut zu sein (S. 351-408).

Abschließend muß das Buch m. E. positiv beurteilt werden. Die genannten Mängel heben seinen Wert nicht auf. Denn hier liegt (1) eine – auch in der gekürzten deutschen Fassung – umfangreiche Dokumentation weithin vergessener (und verdrängter?) Befunde vor, die in anderen wissenschaftshistorischen Werken übergangen werden. Durch die ausführlichen (bei Fremdsprachen übersetzten) Zitate aus Primär- und Sekundärquellen wird (2) der Leser bis zu einem gewissen Grad in die damaligen Debatten mit hineingenommen. Das vermittelt den Eindruck von Objektivität. Vor allem aber sollten (3) erneute wissenschaftliche Grabungen an den wichtigsten Fundorten vorgenommen werden, die hoffentlich durch „Verbotene Archäologie" angeregt werden. Da viele Fundstellen säugetierstratigraphisch eingestuft wurden, könnte das (4) die Bedeutung dieser Methode auch der schöpfungstheoretischen Seite verdeutlichen. Denn die Biostratigraphie war es gerade, die zu einer für die Evolutionstheorien problematischen, weil hier zu frühen Einstufung der Funde führte.

Es kann m. E. zuversichtlich angenommen werden, daß ein harter Kern der Fundobjekte, insbesondere tertiäre Feuersteinwerkzeuge, auch heutiger wissenschaftlicher Kritik standhalten dürfte. Da die Anerkennung der Existenz von Menschen bereits im Tertiär – oder sogar noch früher? (vgl. S. 346-350) – jedoch eine wissenschaftliche Revolution unerhörten Ausmaßes bedeuten würde, kann eine objektive Überprüfung der Funde leider auch gegenwärtig kaum erwartet werden, wie bereits die erwähnten Rezensionen befürchten lassen müssen. Zu tief, so scheint es, greifen hier weltanschauliche Vorurteile in den Erkenntnisprozeß ein.

Manfred Stephan

Literatur

ADAM KD (1995) Ein Trugbild vom Eigenweg des *Homo sapiens*. Fossilien *12*, 74, 77.

BRANDT M (1992) Gehirn und Sprache. Fossile Zeugnisse zum Ursprung des Menschen, Berlin: Pascal.

BRANDT M (1995) Der Ursprung des aufrechten Ganges. Zur Fortbewegung der plio-pleistozänen Hominiden, Edition Pascal, Neuhausen: Hänssler.

FREUDENBERG W (1919) Die Entdeckung von menschlichen Fußspuren und Artefakten in den tertiären Geröllschichten und Muschelhaufen bei St. Gilles-Waes, westlich Antwerpen. Prähist. Z. *11*, 1-56.

HARTWIG-SCHERER S (1991) Paläanthropologie und Archäologie des Paläolithikums. In SCHERER S (Hg) Die Suche nach Eden. Wege zur alternativen Deutung der menschlichen Frühgeschichte, 55-110, Neuhausen: Hänssler.

KLAATSCH H (1905) Die tertiären Silexartefakte aus den subvulkanen Sanden des Cantal. Arch. Anthropol., N.F. *3*, 153-160.

SCHWEINFURTH G (1907) Über A. Rutots Entdeckung von Eolithen im belgischen Oligocän. Z. Ethnol. *39*, 958f.

STARCK D (1995) Rezension zu Cremo, M.A.; Thompson, R.L.: Forbidden Archeology: The Hidden History of the Human Race. Z. zool. Syst. Evolut.-forsch. *32*, 348.

VERWORN M (1905) Die archaeolithische Cultur in den Hipparionschichten von Aurillac (Cantal). Abh. d. k. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Math.-Phys. Kl., N.F. *4 (4)*, 3-60.

Michael Brandt

Gehirn und Sprache

Fossile Zeugnisse zum Ursprung des Menschen

Pascal-Verlag Berlin, 1992. 93 S.; 35 Abb.; 10 Tab.
Format 16,5 x 24;

ISBN 3-927390-08-9, Bestell-Nr.: 899.808,
DM 18,– / sfr 18,40

Australopithecus, Homo habilis und *Homo erectus* werden als die wichtigsten Zwischenstufen in der Entwicklung zum modernen Menschen betrachtet. Die Zusammenschau der vorliegenden Ergebnisse zeigt, daß entgegen der verbreiteten Sichtweise der Evolution des Menschen als kontinuierlichem Entwicklungsprozeß die vorliegenden Daten eher ein diskontinuierliches Bild ergeben. Unumstrittene Übergangsglieder, die eine allmähliche Umwandlung eines menschenaffenähnlichen Gehirns in ein menschliches Gehirn belegen, wurden bisher nicht beschrieben.

Aus dem Inhalt:
Teil 1: Schädelinnenausgüsse fossiler Hominiden – Endocranialausgüsse – Zeugnisse vergangener Lebensformen – Schädelinnenausgußanalyse: Gehirnvolumen, Gehirnstruktur – Diskussion von Hirnsulcusmustern einiger fossiler Hominiden – Chancen und Grenzen der Paläneurologie für die Zuordnung fossiler Formen
Teil 2: Fossilien, Steinwerkzeuge und der Ursprung der menschlichen Sprache – Der Neandertaler als „connecting link" in der Sprachevolution? – Händigkeit, Hemisphärenlateralisation und Sprache – Kognitive Fähigkeiten und Werkzeugherstellung – Konnte die Hand von *Australopithecus* Werkzeuge herstellen?

Reinhard Junker

Rudimentäre Organe und Atavismen

Konstruktionsfehler des Lebens?

Pascal-Verlag, 1989, 85 Seiten, 35 Abbildungen, Format 16,5 x 24;
Bestell-Nr. 79.752,
ISBN 3-927390-03-8,
DM 18,– / sfr 18,40

Trägt der Mensch das Erbe tierischer Vorfahren in sich? Rudimentäre Organe und Atavismen bilden als „Evolutionsbeweise" einen Schwerpunkt im evolutionär orientierten Biologieunterricht. Dies ist insofern bemerkenswert, als die einschlägige Primärliteratur die entsprechende Grundlagenforschung nicht widerspiegelt.

Die Arbeit bietet dem interessierten Spezialisten und dem gebildeten Laien den Zugang zu einer weit verstreuten und oft schwer zugänglichen Fachliteratur. Angesichts der Tatsache, daß die letzte große Monographie über rudimentäre Organe dreißig Jahre alt ist, wird mit dieser Publikation ein den Stand der Wissenschaft wiedergebender Einstieg in die Thematik ermöglicht.

Aus dem Inhalt:
Was sind „rudimentäre Organe"? (Kriteriendiskussion) – Rudimentäre Organe im Kontext der Evolutionslehre – Kritische Diskssion zur „Biogenetischen Grundregel" – Deutung von Atavismen – Sach-, Autoren- und Artnamenregister

Sigrid Hartwig-Scherer

Ramapithecus

Vorfahr des Menschen?

Pascal-Verlag Berlin, 1989, 63 Seiten, 20 Abbildungen, 8 Tabellen, Format 16,5 x 24;
Bestell-Nr. 79.751,
ISBN 3-927390-00-3,
DM 18,– /sfr 18,40

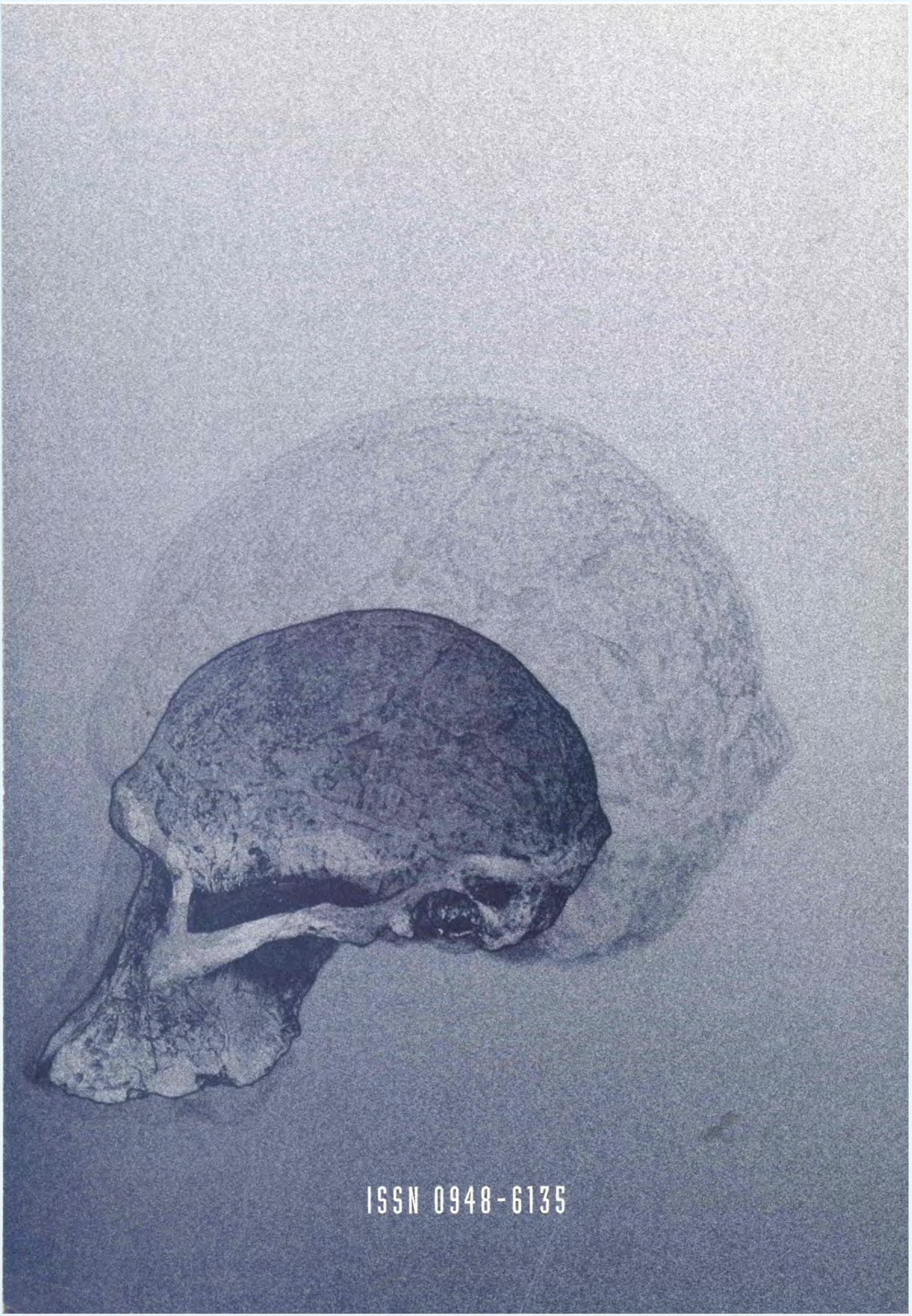
Die Arbeit zeichnet unter umfassender Berücksichtigung auch der neuesten Literatur die bisweilen verschlungenen Pfade nach, auf denen sich die Meinungen der Paläanthropologen bezüglich *Ramapithecus* und verwandter fossiler Formen in den letzten fünf Jahrzehnten bewegten: Ein faszinierendes Kapitel paläanthropologischer Forschung wird vor dem Leser ausgebreitet.

Ramapithecus, einst erster Hominide und damit früher Vorfahr des Menschen, entpuppt sich heute eher als Verwandter des asiatischen Menschenaffen Orang-Utan. Die Faktoren, welche für einen derart gravierenden Deutungswandel verantwortlich sein könnten, sind nicht nur für den Anthropologen interessant, illustrieren sie doch die grundsätzliche Abhängigkeit aller Fossildeutungen von den jeweils aktuellen evolutionstheoretischen Rahmenvorstellungen.

Aus dem Inhalt:
Geschichtlicher Überblick – Kritische Anfragen an verschiedene Rekonstruktionsversuche – Probleme der Merkmalswertung und Klassifikation – Einflüsse der Molekularbiologie – Neufunde aus der Türkei und Pakistan – Mögliche Verwandtschaft zum Orang Utan – Die chinesischen Fossilien aus Lufeng – Anhang mit Kurzbeschreibung der wichtigsten Funde und ausführlichem Glossar

Erhältlich im Buchhandel oder bei
SG Wort & Wissen • Rosenbergweg 29 • 72270 Baiersbronn
Telefon (0 74 42) 44 72 • Fax 5 05 23

INTEGRALE-LITERATUR



ISSN 0948-6135